



**MINISTRY OF EDUCATION OF THE REPUBLIC OF BELARUS
STATE COMMITTEE ON STANDARDIZATION OF THE REPUBLIC
OF BELARUS
NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS**

BELARUSIAN NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY

BELARUSIAN STATE INSTITUTE OF METROLOGY

**INSTITUTE OF APPLIED PHYSICS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF
BELARUS**

INSTRUMENTATION ENGINEERING-2020

**Proceedings
of the 13th International Scientific and Technical Conference**

November 18–20, 2020
Minsk, Belarus

**The Conference is dedicated to the 100th
anniversary of Belarussian National
Technical University
(BPI – BSPA – BNTU)**

**Minsk
BNTU
2020**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ**

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН БЕЛАРУСИ**

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ-2020

**Материалы
13-й Международной научно-технической конференции**

18–20 ноября 2020 года
Минск, Республика Беларусь

**Конференция посвящается 100-летию
Белорусского национального
технического университета
(БПИ – БГПА – БНТУ)**

**Минск
БНТУ
2020**

УДК 681.2(063)
ББК 34.9я431
П 75

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, профессор *О.К. Гусев* (председатель);
канд. техн. наук, доцент *Р.И. Воробей*; д-р техн. наук, доцент *Н.А. Жагора*;
д-р техн. наук, профессор *М.Г. Киселёв*; д-р физ.-мат. наук, доцент *М.А. Князев*;
д-р физ.-мат. наук, профессор *Н.В. Кулешов*; чл.-корр. НАН Беларуси, д-р физ.-мат. наук,
профессор *А.М. Малярович*; д-р физ.-мат. наук *В.В. Машко*; чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, про-
фессор *Ю.М. Плескачевский*; канд. техн. наук, доцент *А.Л. Савченко*; канд. техн. наук, доцент
А.И. Свистун; д-р техн. наук, профессор *П.С. Серенков*; д-р техн. наук, профессор *В.Л. Соломахо*;
канд. техн. наук, доцент *А.К. Тявловский*; академик НАН Беларуси, д-р техн. наук,
профессор *С.А. Чижик*; д-р физ.-мат. наук, профессор *К.В. Юмашев*;
канд. техн. наук, доцент *Н.Н. Ризноокая* (отв. секретарь)

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор *Л.М. Лыньков*;
д-р техн. наук, профессор *Е.Е. Петюшик*

Издание включает материалы 13-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение-2020» по направлениям: измерительные системы и приборы, технические средства безопасности; методы исследований и метрологическое обеспечение измерений; физические, физико-математические, материаловедческие и технологические основы приборостроения; оптико-электронные системы, лазерная техника и технологии.

Материалы конференции могут представлять интерес для научных работников, преподавателей вузов, аспирантов и магистрантов, специалистов реального сектора экономики, занимающихся исследованиями, разработкой и производством приборов и измерительных систем.

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

УДК 544.478; 544.72

ГЕТЕРОГЕННЫЕ ФЕНТОН КАТАЛИЗАТОРЫ НА ОСНОВЕ $MgFe_2O_4$, $MgL_nFe_{(2-x)}O_4$, $MgFe_2O_4@g-C_3N_4$ ДЛЯ ДЕСТРУКЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛЛЮТАНТОВ

Иванец А.И., Прозорович В.Г.

Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

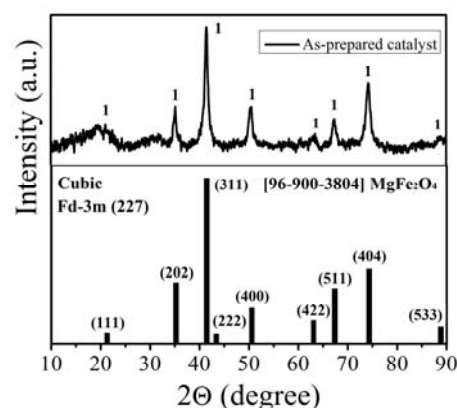
Гетерогенный Фентон процесс является одним из наиболее эффективных и широко используемых разновидностей *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) используемых для очистки промышленных стоков от устойчивых органических поллютантов. Разработка гетерогенных Фентон катализаторов позволяет избежать недостатков гомогенного катализа и обеспечить необходимые параметры для их промышленного использования в технологиях водоочистки. Среди перспективных гетерогенных Фентон катализаторов, в настоящее время, особое место занимают ферриты металлов и композиты на их основе с узкозонными полупроводниками. Данные материалы характеризуются высокой стабильностью, развитой поверхностью, малым размером частиц, а также высокой каталитической активностью при облучении в видимом диапазоне [1].

В настоящей работе предложены высокоэффективные гетерогенные Фентон катализаторы на основе $MgFe_2O_4$, $MgL_nFe_{(2-x)}O_4$, $MgFe_2O_4@g-C_3N_4$, установлены закономерности их синтеза, а также изучены каталитические свойства в процессах деструкции органических поллютантов на примере органических красителей и нестероидных противовоспалительных препаратов [2–4].

Ибупрофен – нестероидный противовоспалительный препарат, который широко используется как обезболивающее и жаропонижающее средство для взрослых и детей. Высокий годовой расход (~200 тонн в год) и низкая метаболическая конверсия ибупрофена в организме человека приводит к присутствию его производных в очистных сооружениях сточных вод, в поверхностных водах и даже в питьевой воде. Традиционные процессы очистки воды (коагуляция/флокуляция, фильтрация и биологическая очистка) не позволяют удалять фармацевтические препараты, что обуславливает важность разработки новых методов удаления этих продуктов из водных объектов.

Фентон-подобный катализатор на основе наночастиц $MgFe_2O_4$ синтезирован глициннитратным методом. Образец феррита магния характеризуется низкой кристалличностью (па-

раметр решетки a 5,961 Å, размер кристаллитов 2,2 нм) и мезопористой структурой (удельная поверхность 14 м²/г, сорбционный объем 0,030 см³/г и средний размер пор 11 нм) и согласно СЭМ представлен в виде сферических агломератов размером около 1 мкм.

Рисунок 1 – Рентгенограмма наночастиц $MgFe_2O_4$

Изучены каталитические свойства наночастиц $MgFe_2O_4$ в процессе окислительной деструкции нестероидного противовоспалительного препарата ибупрофена. Установлено влияние условий проведения каталитического процесса на эффективность разложения ибупрофена. Показано, что при содержании катализатора 0,5 г/л, концентрации H_2O_2 20,0 ммоль/л и pH 6,0 в течение 40 мин достигается снижение концентрации ибупрофена с 10,0 мг/л до концентрации ниже предела обнаружения (рисунок 2).

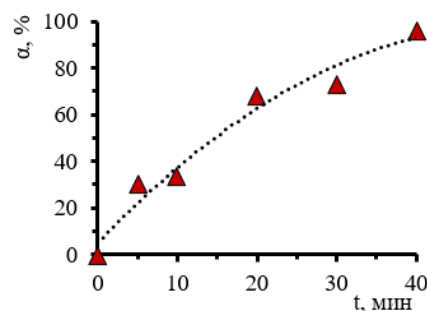


Рисунок 2 – Зависимость степени деструкции ибупрофена от времени контакта

Выявлено, что в процессе каталитической деструкции степень минерализации ибупрофена достигает 100 %. Проведенные исследования свидетельствуют о перспективности практического применения разработанного Фентон-подобного гетерогенного катализатора для очистки сточных вод от фармацевтически активных соединений.

В немногочисленных научных работах было отмечено, что даже очень небольшая концентрация ионов лантаноидов Sm^{3+} и Gd^{3+} (0,964 Å и 0,938 Å), размер которых существенно больше иона Fe^{3+} (0,645 Å), сильно влияет на структурные параметры, а также на размер и морфологию частиц, магнитоэлектрические и каталитические свойства ферритов. Таким образом, допирование ионами лантаноидов предоставляет дополнительные возможности по получению ферритов, принципиальным образом отличающихся не только структурными характеристиками, но и каталитической активностью.

Выявлено, что температура отжига и природа допанта $\text{MgLn}_x\text{Fe}_{(2-x)}\text{O}_4$ (Ln: La^{3+} , Ce^{3+} , Sm^{3+} , Gd^{3+} и Dy^{3+}) является основным фактором, определяющим кристаллическую структуру получаемых ферритов магния. Модификация ионами лантаноидов сопровождалась уменьшением размера кристаллитов D и ростом параметра a кристаллической решетки (рисунок 3). Установлено, что наличие поверхностных -ОН групп критично для гетерогенных Фентон-катализаторов.

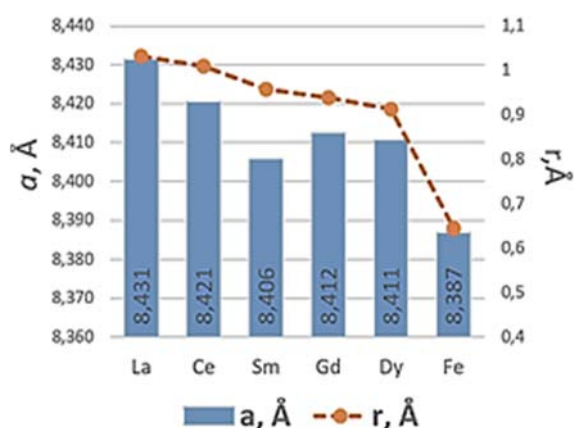


Рисунок 3 – Изменение параметра a кристаллической решетки от природы и радиуса r иона Ln^{3+}

Результатом допирования катионами редкоземельных элементов является снижение скорости разложения красителя метиленового голубого в присутствии H_2O_2 без облучения и при воздействии видимым диапазоном света. Однако при УФ-облучении образцы допированные ионами La^{3+} (1 ат.%), Ce^{3+} (10 ат.%), Dy^{3+} (10 ат.%), продемонстрировали большую активность по сравнению с недопированным MgFe_2O_4 . Соответствующие константы скорости реакции

псевдо первого порядка составили $0,56 \text{ мин}^{-1}$, $0,88 \text{ мин}^{-1}$, $0,683 \text{ мин}^{-1}$, в то время как для исходного MgFe_2O_4 это значение составило $0,328 \text{ мин}^{-1}$.

Графитоподобный нитрид углерода ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) обычно получают простой термической конденсацией прекурсоров меламина ($\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$), дициандиамида ($\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4$) или мочевины ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$). При этом $g\text{-C}_3\text{N}_4$ характеризуется дефектной структурой и малой удельной поверхностью, низкой подвижностью заряда и недостаточно высокой каталитической активностью.

В настоящей работе синтезированы композиты $\text{MgFe}_2\text{O}_4@g\text{-C}_3\text{N}_4$ тремя различными способами и исследованы их фазовый состав и кристаллическая структура. Установлено, что при смешении MgFe_2O_4 с меламином и последующей их термообработкой при $300 \text{ }^\circ\text{C}$ получен композит $\text{MgFe}_2\text{O}_4@g\text{-C}_3\text{N}_4$ с хорошо идентифицируемыми кристаллическими фазами MgFe_2O_4 и $g\text{-C}_3\text{N}_4$. При введении $g\text{-C}_3\text{N}_4$ в глицин-нитратный гель на стадии его нагрева образуется смесь триклинной модификации $g\text{-C}_3\text{N}_4$ и рентгеноаморфного феррита магния. Рентгеноаморфный композит $\text{MgFe}_2\text{O}_4@g\text{-C}_3\text{N}_4$ был получен при введении меламина в глицин-нитратный гель с последующими стандартными операциями получения MgFe_2O_4 , что, вероятно, может быть следствием интенсивного протекания экзотермического процесса горения глицин-нитратной смеси и поликонденсацией меламина в неравновесных условиях. Установленные закономерности синтеза композитов $\text{MgFe}_2\text{O}_4@g\text{-C}_3\text{N}_4$ важны для разработки эффективных Фентон катализаторов.

Таким образом, представленные результаты демонстрируют принципиальную возможность осуществления контроля структурных и каталитических характеристик гетерогенных Фентон катализаторов на основе MgFe_2O_4 , $\text{MgLn}_x\text{Fe}_{(2-x)}\text{O}_4$, $\text{MgFe}_2\text{O}_4@g\text{-C}_3\text{N}_4$ посредством варьирования условий синтеза. Представляется перспективным экспериментальное обоснование практического использования данных каталитических систем для очистки реальных сточных вод.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект №X19ЛИТГ-007).

Литература

- Gautam P. Advanced oxidation processes for treatment of leachate from hazardous waste landfill: A critical review / P. Gautam, S. Kumar, S. Lokhandwala // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 237. – P. 117639.
- Иванец А.И. Окислительная деструкция ибупрофена в присутствии фентон-катализатора на основе наночастиц MgFe_2O_4 . / А.И. Иванец, М.Ю. Рошина, В.Г. Прозорович. – 2019. – Т. 55. – № 3. – С. 349–355.

3. Ivanets A. Effect of metal ions adsorption on the efficiency of methylene blue degradation onto $MgFe_2O_4$ as Fenton-like catalysts / A. Ivanets, M. Roshchina, V. Srivastava et al. // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2019. – Vol. 571, no. 1. – P. 17–26.

4. Ivanets, A. Heterogeneous Fenton oxidation using magnesium ferrite nanoparticles for ibuprofen removal from wastewater: optimization and kinetics studies / A. Ivanets, V. Prozorovich, M. Roshchina et al. // *Journal of Nanomaterials*. – 2020. – Article ID 8159628.

УДК 621

РАЗРАБОТКИ ОАО «ПЕЛЕНГ» В ОБЛАСТИ КОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Поздняков П.Г.

ОАО «Пеленг»

Минск, Республика Беларусь

С 1976 года ОАО «Пеленг» создает съемочную аппаратуру для космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). За это время сделано немало.

С 1976 по 2005 г. предприятие поставило 21 комплект топографической фотоаппаратуры для космического картографического комплекса «Комета» и 10 многозональных фотокамер МК-4 для космического комплекса «Ресурс-Ф2». В этот же период выполнены контракты в интересах Иностранных заказчиков. Но все это была пленочная целевая аппаратура.

С начала 2000-х годов ОАО «Пеленг», в соответствии с мировыми тенденциями в сфере ДЗЗ, приступило к разработке оптико-электронной целевой аппаратуры.

В июле 2012 года на орбиту были выведены Белорусский КА и однотипный российский КА «Канопус-В» с нашей целевой аппаратурой (разрешение 2 метра). Проект оказался успешным, и в настоящее время на орбите Земли находятся 7 таких КА, причем первый аппарат продолжает штатно функционировать.

Собственный космический аппарат с оптико-электронной аппаратурой (ОЭА) ОАО «Пеленг» позволил Республике Беларусь выйти на новый этап развития в области космических и геоинформационных технологий.

Следующим значимым шагом для направления космической техники в ОАО «Пеленг» стало создание системы оптико-электронного наблюдения с пространственным разрешением 60–70 см. К настоящему моменту запущено на орбиту Земли два КА, продемонстрировавшие высокое качество снимков.

Параллельно в ОАО «Пеленг» проектируется и изготавливается другая технологичная аппаратура космического назначения.

Разработан уникальный гиперспектрометр, выполняющий одновременную съемку в 60-ти спектральных каналах для автоматической идентификации объектов и определения их свойств по спектральному составу отраженного излучения, в том числе обеспечивая возможность измерять параметры атмосферы с целью компенсации ее влияния на качество снимков.

Разработаны датчики ориентации по звездам, служащие для определения угловой ориентации КА в пространстве, а также система повышения точности определения угловой ориентации съемочной аппаратуры.

Созданы и лазерные высотомеры – оптико-электронные комплексы, предназначенные для измерения высоты рельефа местности с целью создания топографических карт, а также стереоскопические системы для создания 3D-модели рельефа поверхности Земли с пространственным разрешением менее 1 м и точностью определения высоты на уровне 1 м.

В настоящее время ОАО «Пеленг» осуществляет разработку съемочной аппаратуры следующего поколения с разрешением 0,3–0,4 м. Объектив ОЭА выполнен по зеркальной усовершенствованной схеме, оснащен удаленной подсистемой юстировки и фокусировки, диаметр главного зеркала – 1100 мм. Фотоприемники проектируются и изготавливаются белорусским предприятием. Также ОЭА сможет выполнять видеосъемку длительностью до 80 секунд.

УДК 535.241

**НАЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ В ОБЛАСТИ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКИ И ОПТИКИ**
Баковец Н.В.¹, Длугунович В.А.², Жагора Н.А.¹, Исаевич А.В.², Никоненко С.В.², Тарасова О.Б.¹

Белорусский государственный институт метрологии

Минск, Республика Беларусь

²Институт физики НАН Беларуси

Минск, Республика Беларусь

В настоящее время фотоника является одной из самых перспективных и быстро развивающихся областей науки и техники. Лазерная техника, оптоволоконные системы связи и передачи информации с основанными на них системами телекоммуникации, а также информационные технологии, нанофотоника, являются ядром Пятого и Шестого технологических укладов.

Республика Беларусь является одной из немногих стран с развитой оптико-механической промышленностью, основу которой составляют свыше двадцати предприятий с уровнем экспорта более 80 %. Развитие данного сектора экономики невозможно без современного метрологического обеспечения. Однако после распада Советского Союза Республика Беларусь оказалась без метрологического обеспечения в этом наукоемком секторе экономики, т. к. метрологические центры и эталоны в области оптики, лазерной и оптоэлектронной техники остались в Российской Федерации и в Украине. Поэтому создание и развитие метрологического обеспечения изделий оптики, лазерной и оптоэлектронной техники, прогнозирование их ресурса, повышение уровня точности и достоверности измерений параметров и характеристик оптического излучения является в Беларуси актуальной задачей.

Началом работы можно считать 1993 г., когда были разработаны и введены в действие первые основополагающие государственные стандарты Республики Беларусь для систем обеспечения единства измерений и аккредитации поверочных и испытательных лабораторий. В 1994 г. была разработана концепция программы создания эталонов Республики Беларусь. Национальные эталоны являются национальным достоянием, неотъемлемым атрибутом государственности, и их состояние определяет уровень научного, технического и культурного развития страны. Наличие Национальной эталонной базы является законодательно закрепленным элементом государственной структуры большинства промышленно развитых стран, а в некоторых из них, как, например, в России, объектом конституционного права.

Создание национальной системы метрологического обеспечения Республики Беларусь в области лазерной техники и оптики существенно ускорилось после того как в 2000 г. в ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ НАН Беларуси, во ис-

полнение поручений Президента Республики Беларусь от 08.07.1999 (протокол № 9) и Совета Министров Республики Беларусь от 03.11.1999 № 05/540-220, была создана научно-испытательная лаборатория лазерной техники, на которую возложили обязанности по метрологическому обеспечению разрабатываемой, создаваемой и используемой в стране лазерной и оптоэлектронной техники.

Развитие эталонной базы в области оптики и оптоэлектронной техники в Республике Беларусь началось с создания в 2000 г. Национального эталона координат цвета, единиц спектральных коэффициентов направленного пропускания и диффузного отражения в диапазоне длин волн (0,2–2,5) мкм. В 2002 г. был создан Национальный эталон единиц силы света и освещенности. В 2008–2010 гг. осуществлена модернизация этого эталона, позволившая существенно расширить его функциональные и измерительные возможности. Для обеспечения единства измерений в области спектрофотометрии материалов, выпускаемых предприятиями текстильной, бумажной и лакокрасочной промышленности, в 2007 г. разработан исходный эталон единиц белизны, которому в 2018 г. был присвоен статус национального эталона. В 2010 г. создан эталон единицы спектральной чувствительности приемников излучения, который играет ключевую роль во взаимосвязи радиометрических и фотометрических величин. В 2016 г. введен в эксплуатацию Национальный эталон единицы светового потока источников непрерывного излучения, а в 2019 г. – Национальный эталон единиц спектральной плотности энергетической яркости, спектральной плотности энергетической освещенности и силы излучения в диапазоне длин волн от 0,2 до 3,0 мкм.

Для организации метрологического контроля в области лазерной техники в 2006 г. был создан исходный эталон единицы средней мощности лазерного излучения (ЛИ), который в 2017-2019 гг. модернизирован до уровня Национального эталона единиц средней мощности и энергии ЛИ.

В настоящее время волоконно-оптические системы связи и передачи информации (ВОСП) являются основным направлением развития телекоммуникационных систем. Они обладают рядом существенных преимуществ перед анало-

гичными системами связи других видов. Поэтому в 2014 г. был разработан и создан эталон единиц средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения для ВОСП, а в 2019 г. – Национальный эталон единицы поляризации модовой дисперсии в оптическом волкне.

Проведенные международные сличения созданных эталонов Республики Беларусь в области лазерной техники и оптики, подтвердили соответствие мировому уровню их основных метрологических характеристик. Это позволило разместить БелГИМ 11 строк (из 273 строк по всей национальной эталонной базе Республики Беларусь) в базе данных о калибровочных и измерительных возможностях на сайте Международного бюро мер и весов.

В период с 2003–2019 гг. в Институте физики НАН Беларуси создано 17 установок и комплексов высокой точности для осуществления метрологического контроля энергетических, временных, пространственных, спектральных и поляризационных характеристик ЛИ, а также фотометрических, спектрометрических и пространственных характеристик излучения светодиодов. В БелГИМ созданы установки высокой точности: для поверки люксметров и фотометров; для проведения метрологического контроля УФ-радиометров и для поверки денситометров. Данные установки и комплексы используются для метрологического контроля средств измерений (СИ) и испытаний оптоэлектронной техники, выпускаемой и эксплуатируемой предприятиями и организациями как Республики Беларусь, так и в странах СНГ и дальнего зарубежья.

Одновременно с созданием и применением эталонно-измерительного комплекса метрологического контроля лазерно-оптической отрасли страны были разработаны единые метрологические требования к СИ, методикам выполнения измерений и результатам измерений, методикам калибровки и порядку проведения работ по метрологическому контролю в области лазерной техники и оптики.

Одним из важнейших направлений в данной деятельности является разработка национальных стандартов, нормирующих технические требования к методам и условиям выполнения измерений и проведения калибровки СИ. Закон Республики Беларусь «О техническом нормировании и стандартизации» одной из целей технического нормирования и стандартизации ставит приоритетное использование международных стандартов. С 2002 по 2020 гг. подготовлены и постановлениями Госстандарта утверждены и введены в действие около 100 государственных стандартов, гармонизированных с международными нормами. Стандарт по лазерной безопасности

СТБ ИЕС 60825-1 «Безопасность лазерных изделий. Часть 1. Классификация оборудования и требования» включен в качестве взаимосвязанного стандарта в Технические регламенты Таможенного союза ТР ТС 004 «О безопасности низковольтного оборудования» и ТР ТС 008 «О безопасности игрушек».

Разработано около 80 программ и методик метрологической аттестации, методик выполнения измерений, калибровки и поверки СИ.

Национальная система метрологического обеспечения Республики Беларусь в области лазерной техники и оптики была создана на основе выполненных коллективом авторов научных исследований и опытно-конструкторских разработок с учетом передовых мировых достижений, соответствует мировому уровню и является элементом суверенитета Республики Беларусь.

В год выполняется контроль порядка 4000 приборов для более, чем 2000 организаций Минздрава, Минпрома, Госстандарта, Госкомвоенпрома, Министерства связи и информатизации, Минсельхозпрода, Минобразования, Минтранса и предприятий инновационного профиля.

Результаты представленной работы имеют высокую социальную значимость: правильность показаний медицинской измерительной техники и точность измерений характеристик лазерной терапевтической, хирургической, офтальмологической и другой аппаратуры определяют корректность диагноза и эффективность лечения населения; метрологический контроль приборов для измерений оптических характеристик светофоров, дорожных знаков и дорожного покрытия направлены на обеспечение безопасности дорожного движения и снижение травматизма и смертности на дорогах страны; корректное определение уровней рассеянного лазерного излучения и условий освещения на рабочих местах, в детских дошкольных учреждениях, в учреждениях образования обеспечивает на государственном уровне контроль безопасных условий труда и отдыха; созданная национальная система способствует достижению информационной безопасности Республики Беларусь и является необходимым элементом развития Беларуси как IT-страны.

Национальная академия наук Беларуси выдвинула работу Института физики НАН Беларуси и БелГИМ «Создание национальной системы метрологического обеспечения Республики Беларусь в области лазерной техники и оптики» на соискание Государственной премии Республики Беларусь в области науки и техники 2020 года. Этот факт подтверждает возрастающую роль современного метрологического контроля в производстве современных изделий оптико-механического сектора экономики Республики Беларусь.

УДК 615.471

НОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ЛЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО УЛЬТРАЗВУКА И ВАКУУМНОЙ ТЕРАПИИ

Алексеев Ю.Г.¹, Минченя В.Т.², Королёв А.Ю.¹, Нисс В.С.²

¹Республиканское инновационное унитарное предприятие
«Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Ультразвуковые методы применяются в медицине уже на протяжении долгого времени. В физиотерапии используется способность ультразвука оказывать механическое, химическое и тепловое воздействие на ткани организма. Низкочастотный ультразвук (20–80 кГц) высокой интенсивности применяется в хирургии для разрушения, резки, сварки и коагуляции биологических тканей. Высокочастотный ультразвук (0,5–4,0 МГц) применяется в виде сфокусированного пучка для неинвазивного разрушения мягких тканей (например, опухолей головного мозга), остеотомии (рассечения костей), гемостаза, а также для разрушения камней в полых органах [1]. Нами выполнены исследования и разработаны новые виды ультразвукового оборудования и методы применения низкочастотного высокоинтенсивного ультразвука в сосудистой хирургии, онкологии, стоматологии, а также вакуумное оборудование для лечения острых и хронических инфицированных ран методом вакуумной повязки.

Оборудование для ультразвукового разрушения внутрисосудистых образований и повышения эластичности сосудистой стенки

В качестве альтернативы существующим методам лечения, когда попытки восстановления просвета стенозированных и/или окклюзированных артерий внутрипросветной или субинтимальной реканализации, в большинстве случаев оказываются безуспешными, предложен новый комплексный метод лечения, включающий на первом этапе ультразвуковую абляцию окклюзий артерий магистрального типа, а на втором – проведение чрескожной транслюминальной баллонной ангиопластики самостоятельно длинными баллонами или в сочетании со стентированием.

Для реализации предложенного метода разработано новое специальное оборудование (рисунок 1), включающее ультразвуковой генератор с пьезоэлектрическим преобразователем и сменные трубчатые инструменты-волноводы [2, 3].

Применение в сосудистой кардиологии трубчатых инструментов-волноводов длиной до 810 мм для ангиопластики (рисунок 2) обеспечивает эффективное разрушение тромбообразований, а также внутрисосудистое ремоделирование пораженной артериальной стенки путём вибромеханического воздействия, а также вибромеханической фрагментации пораженной

интимы с последующим удалением разрушающихся частиц ткани путем их аспирации из артериального русла. Преимуществами метода ультразвукового разрушения тромбов перед традиционными терапевтическими и хирургическими методами являются: отсутствие оперативного вмешательства; низкая вероятность осложнений; низкая стоимость лечения. Установлено, что низкочастотный низкоинтенсивный ультразвук приводит к повышению эластических свойств и податливости сосудистой стенки пораженной артерии [4].



Рисунок 1 – Ультразвуковое оборудование для внутрисосудистого разрушения тромбообразований



Рисунок 2 – Трубчатый ультразвуковой инструмент-волновод для внутрисосудистого разрушения тромбообразований

Конструкция трубчатой волноводной системы переменного сечения для ультразвукового воздействия на стенки артерий и на сосудистые образования, кроме инструмента-волновода, также включает катетер. Внутренние каналы системы (рисунок 3) предназначены для:

- доставки лекарственных средств, обеспечивающих тромболитическое действие, в зону разрушения внутрисосудистых образований;
- обеспечения сочетанного действия акустоиндуцированного тромболитического действия и подаваемой по каналу жидкости под давлением.



Рисунок 3 – Схема движения потоков жидкости через систему, включающую инструмент-волновод и катетер

По результатам проведенных исследований метода и оборудования установлено, что в результате 10-минутного ультразвукового воздействия происходит повышение относительной деформации сегмента «мягкого» сосуда в 1,3–1,4 раза по сравнению с исходным сосудом. В результате ультразвукового воздействия в течении такого же временного промежутка на сегмент «твердого» сосуда степень его деформируемости повышается в 2,3–3,9 раза при нагрузке в 0,01 Н и в 1,5 раза при нагрузке 0,2 Н. Эффективность ультразвукового повышения эластичности сосудов наиболее выражена для «твердых», хрупких, сильно кальцифицированных сосудов, по сравнению с «мягкими» сосудами. Состояние сосудов до и после ультразвукового внутрисосудистого воздействия показано на рисунке 4.

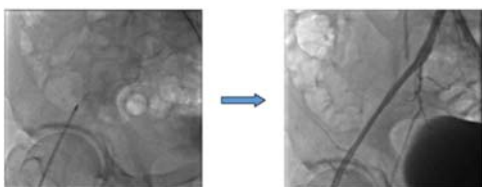


Рисунок 4 – Состояние сосудов до и после ультразвукового воздействия

Ультразвуковое оборудование для комплексного лечения кожных онкологических заболеваний

В настоящее время уделяется большое внимание изучению и использованию ультразвука в онкологии в качестве противоопухолевого агента в сочетании с другими методами лечения. Однако применению ультразвука в качестве модификатора радиотерапии уделяется недостаточное внимание.

Для использования в онкологии с целью лечения кожных опухолевых образований нами разработано ультразвуковое оборудование и инструменты-волноводы кольцевой формы (рисунок 5). Установлено, что введение ультразвука с помощью кольцевых инструментов-волноводов в поражённый участок кожи совместно ионизирующим излучением обеспечивает усиление радиосенсибилизирующего противоопухолевого эффекта, что позволяет снизить на 25 % дозу облучения.

Характеристики разработанного оборудования:

- частота – 22–28 кГц;
- интенсивность ультразвука – 0,5–10 Вт/см²;
- продолжительность одного сеанса – 3–5 мин.

Оборудование применяется для комбинированного лечения кожных онкологических заболеваний (исключая меланому) I–II стадий (локальное ультразвуковое воздействие на кожные опухолевые образования с последующей лучевой терапией).



Рисунок 5 – Ультразвуковое оборудование для лечения кожных онкологических образований

По результатам исследования метода экспериментально доказана эффективность применения кольцевых волноводных систем для сочетанной терапии опухолей – ультразвук + лучевая терапия. Установлено, что наиболее значимые изменения в опухоли штамма саркомы отмечаются при ультразвуковом воздействии 2,0–2,5–3,0 Вт/см². При этом определяется усиление процессов перекисного окисления липидов и увеличение показателей антиоксидантной системы.

При возбуждении в кольце колебаний с частотой, соответствующей собственной частоте его изгибных колебаний, внутри кольца возникают управляемые акустические давления, приводящие к самоорганизации системы частиц, помещенных внутрь кольца. При изменении частоты акустического поля происходит модификация пространственного распределения акустического давления внутри кольца и изменение направления действия радиационных сил, которые оказывают бесконтактное воздействие на среду.

Клинические испытания, проведенные в 2013 и 2016 гг., показали улучшение результатов лечения базальноклеточного рака кожи на фоне редукции дозы лучевой терапии в условиях соносенсибилизации на 25 %, что сокращает пребывание пациента в стационаре и соответственно уменьшает фармако-экономические затраты на лечение пациентов по сравнению со стандартной методикой. Лечение хорошо переносилось во всех случаях. В результате применения брахитерапии в режиме гипофракционирования с редукцией суммарной очаговой дозы и применением ультразвука уменьшена суммарная очаговая доза, подведенная к опухоли, сокращена длительность курса лечения, сохранена высокая эффективность облучения (100 %) при незначительных лучевых изменениях кожи (1 степень), достигнуты отличные и хорошие косметических результаты.

Непосредственные и ближайшие результаты исследования показывают высокую эффективность, безопасность, хорошую переносимость, комфортность и экономичность разработанного метода контактной лучевой терапии на фоне ультразвуковой модификации.

Акустическая система и ультразвуковая аппаратура для формирования дентинно-пломбировочного соединения

Разработано ультразвуковое оборудование для пломбирования корневых каналов зубов с помощью низкочастотного ультразвука, обеспечивающее более качественное заполнение сложных каналов и соединение пломбировочного материала с дентином (рисунок 6).



Рисунок 6 – Ультразвуковое оборудование для применения в стоматологии

Разработанный нами инструмент-волновод в виде эндодонтической насадки диаметром 0,2–1,0 мм и длиной рабочей части 14–21 мм применяется при пломбировании корневых каналов зуба (рисунок 7). Низкочастотный ультразвук, передаваемый эндодонтическим инструмент-волноводом, способствует устранению избыточного содержания воздуха в структуре корневой пломбы, эффективному заполнению внутренней полости корневого канала и микроканалов корня зуба, при котором пломбировочный материал образует герметичное соединение с дентином канала корня зуба. Ультразвуковое воздействие приводит к увеличению адгезии пломбировочного материала к дентину корня зуба, вследствие его проникновения в пористую структуру дентина. Для изготовления инструментов-волноводов нами разработана технология получения конических поверхностей на изделиях малого диаметра методом размерной электролитно-плазменной обработки [5, 6].



Рисунок 7 – Инструменты-волноводы (насадки), применяемые при пломбировании корневых каналов зуба

Ультразвуковую конденсацию пломбировочного материала осуществляют комбинированными ультразвуковыми колебаниями частотой 22–28 кГц, за счёт чего заполняются мелкие дентинные каналы, латеральные каналы корня зуба, происходят процессы изменения структурирования пломбировочного материала (рисунок 8).

По результатам испытаний установлено, что низкочастотный ультразвук с резонансной частотой 25 кГц способствует изменению физико-химических свойств эндодонтических пломбиро-

вочных материалов, о чем свидетельствует улучшение структурных показателей водорастворимости, вязкости и прочности на сжатие исследованных пломбировочных материалов (силеров). При анализе клинических данных пломбирования корневых каналов депульпированных зубов, адекватно запломбированных при помощи низкочастотного ультразвука всех групп зубов обнаружено, что признаки качественной obturation корневых каналов отмечались у 93% исследованных зубов.



Рисунок 8 – Наконечник в корневом канале

Наибольший интерес с точки зрения успешного эндодонтического лечения представляет исследование качества obturation корневых каналов в апикальной части корня зуба. Разветвлённая сеть мелких дентинных каналов в области верхушки корня зуба мало способствует последующей апикальной герметизации, проводимой традиционными методами лечения. Применение низкочастотного ультразвука и гибкого эндодонтического инструмента-волновода для пломбирования корневых каналов зубов в большей мере способствует, заполнению боковых ответвлений в корневых каналах зубов.

Применение разработанного оборудования с различными сменными ультразвуковыми насадками позволяет также выполнять качественное перемешивание пломбировочного материала, насыщение поверхности детских зубов кальцием, а также ряд других функций. Ультразвуковые инструменты-волноводы различного назначения показаны на рисунках 9 и 10.



Рисунок 9 – Ультразвуковая насадка для перемешивания пломбировочного материала



Рисунок 10 – Ультразвуковая насадка для насыщения поверхности детских зубов кальцием

Оборудование для лечения ран вакуумной терапией

Разработанный аппарат вакуумной терапии КМ-1 (рисунок 11) предназначен для выполнения процедур вакуумной терапии, вакуумно-пульсирующей терапии, вакуумного приточно-отсасывающего дренирования, вакуумного приточно-отсасывающего дренирования с одновременной обработкой низкоинтенсивным лазерным излучением красного, инфракрасного спектра с непрерывной, импульсной и импульсной модулированной частоте.



Рисунок 11 – Блок управления аппарата вакуумной терапии КМ-1

Метод заключается в следующем. На рану накладывают вакуумную повязку, состоящую из губки и пленочного покрытия (рисунок 12). Аппарат создает отрицательное давление, под воздействием которого раневое отделяемое поступает по трубке с фиксирующей головкой в резервуар. Под воздействием этого наблюдается сразу несколько терапевтических эффектов, которые способствуют заживлению раны.

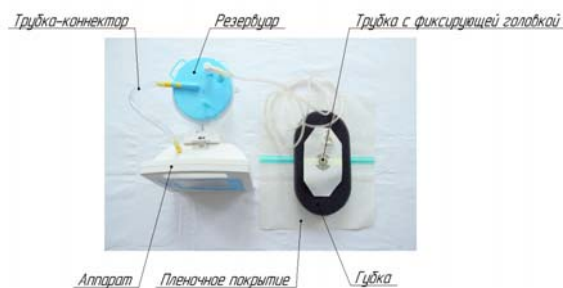


Рисунок 12 – Компоненты аппарата вакуумной терапии КМ-1

Клинические эффекты вакуумной терапии:

– активное удаление избыточного раневого отделяемого, в том числе веществ, замедляющих заживление раны (например, токсины, матриксные металлопротеиназы, продукты распада тканей).

– Сохранение влажной раневой среды, стимулирующей ангиогенез, усиливающей фибринолиз и способствующей функционированию факторов роста.

– Ускорение снижения бактериальной обсемененности тканей раны (общего количества микробных клеток). Доказано, что деконтаминация

(удаление болезнетворных микроорганизмов) ниже критического уровня при вакуум-терапии достигается к 4–5 суткам против 11 суток при других методах местного лечения ран.

– Снижение локального отека тканей, снижение межклеточного давления, усиление местного лимфообращения и транскапиллярного транспорта, что в результате улучшает раневую среду и питание тканей и увеличивает скорость формирования грануляционной ткани, а улучшение перфузии раневого ложа дополнительно способствует деконтаминации раны.

– Усиление местного кровообращения. В исследованиях было выявлено, что прирост интенсивности местного кровообращения при уровне отрицательного давления –125 мм.рт.ст. достигал порядка 400 % по отношению к исходному уровню, а применение локального прерывистого вакуума в течение 5 минут на уровне –125 мм.рт.ст. с последующим снижением вакуумного воздействия в течение 2 мин до –75 мм.рт.ст. является наиболее оптимальным режимом лечебного воздействия на рану для стимуляции местного кровообращения.

– Уменьшение площади раны. Прямое воздействие отрицательного давления на дно и края раны в условиях внешней изоляции оказывает постоянный эффект в отношении краёв раны, способствуя ее стяжению. Этот эффект напрямую снижает размеры раны, независимо от интенсивности клеточной пролиферации. Вакуумная терапия посредством улучшения качества грануляционной ткани повышает шансы на успех в закрытии раны местными тканями. Вследствие того, что вакуумная повязка уменьшает размеры раны, предварительное растяжение местных тканей перед пластикой может не понадобиться.

– Сокращение затрат. Вакуум-повязки накладываются бесценно на продолжительный срок (в среднем на 48 часов). Это позволяет даже в первую фазу раневого процесса обходиться без перевязок, экономия перевязочных средств, препараты местного действия, а также силы и время медицинского персонала.

– Профилактика внутрибольничных инфекций. Длительное отсутствие перевязок у стационарного больного, а значит и контакта раны с инструментом и воздухом лечебного учреждения, руками медицинского персонала снижает риск контаминации раневой поверхности госпитальными штаммами микроорганизмов.

Литература

1. Хилл, К., Бэмбер, Дж., тер Хаар, Г. ред. Ультразвук в медицине. Физические основы применения. Пер. с англ. – М.: Физматлит, 2008. – 544 с.
2. Волновод для внутрисосудистой тромбэктомии тромбов и тромбозов и метод его изготовления : пат. 005704 ЕАПО, МПК А61В 17/22, А61В 17/32 ; С25F 3/16 / А.Г. Мрочек, И.Э. Адзериho, Ю.Г. Алексеев.

ев, В.Т. Минченя, В.Н. Страх, А.Ю. Королёв ; заявитель УП «Технопарк БНТУ «Метолит». – № а 20030052; заявл. 2003.01.24 ; опубл. 2005.02.09 // Офиц. бюл. / Евраз. пат. организ. – 2005. – № 1. – С. 145.

3. Устройство для устранения непроходимости кровеносных сосудов : пат. ЕАПО, МКП А61В 17/22, 17/3203 / Хрусталёв Б.М., Алексеев Ю.Г., Адзерихо И.Э., Минченя В.Т., Королёв А.Ю., Чур С.Н.; заявитель РИУП НТП БНТУ «Политехник». – № 031620 В1; заявл. № 201501114 от 10.28.2015; опубл. 31.01.2019 г. // Офиц. бюл. / Евраз. пат. организ. – 2019. – № 1. – С. 209.

4. Применение ультразвуковых концентраторов-волноводов трубчатого типа для устранения непроходимости кровеносных сосудов / В.Т. Минченя,

И.Э. Адзерихо, А.Ю. Королёв // Докл. БГУИР. – 2016. – № 7 (101). – С. 300–303.

5. Алексеев Ю., Бубулис А., Королёв А., Минченя В., Нисс В., Паулюкас А. Формирование конических изделий малого диаметра методом размерной электролитно-плазменной обработки in the Proceedings of the International Scientific Conference on Mobile Machines, Kaunas, Lithuania, September 20–22, 2017, с. 47–54.

6. Алексеев Ю.Г. Получение конических поверхностей на изделиях малого диаметра методом размерной электролитно-плазменной обработки / Ю.Г. Алексеев, А.Ю. Королёв, В.Т. Минченя, В.С. Нисс // Машиностроение : республиканский межведомственный сборник научных трудов. Вып. 31 / глав. ред. В. К. Шелег. – Минск : БНТУ, 2018. – С. 11–18.

**Секция 1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ, ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА
БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 004.942

**ФИЛЬТРАЦИЯ СЛУЧАЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ
СТАТИСТИЧЕСКОЙ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПРИНЦИПОВ САМООРГАНИЗАЦИИ**

Артемьев В.М., Наумов А.О.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

Введение. Теория фильтрации случайных процессов при априорно известной статистике разработана достаточно полно, и ее результаты позволяют решать широкий круг задач. В тех случаях, когда априорная статистика известна не полностью, нахождение структур оптимальных фильтров существенно усложняется.

К настоящему времени опубликовано большое число результатов в этом направлении [1, 2], однако общей теории решения проблемы не существует. Среди этих исследований следует отметить направление, где сделана попытка решения задачи фильтрации в самой широкой постановке при практически полном отсутствии априорной информации на основе метода стохастической аппроксимации [3]. Полученные при этом вероятностные рекуррентные алгоритмы оказались слишком универсальными и неработоспособными из-за низкой скорости сходимости решения.

Формулировка задачи. Для решения задачи фильтрации на основе эвристической информации целесообразно использовать понятие самоорганизации в смысле предложенном Д. Габором [4]. Согласно ему, в основе самоорганизации лежит принцип неокончателных решений. Его сущность в том, что в условиях неопределенности выбирают ряд простейших гипотез о структуре решения, исходя из имеющейся эвристической информации. Таким образом, предполагается наличие нескольких возможных решений с весовой оценкой каждой гипотезы, исходя из результатов текущих измерений. В условиях неопределенности различие между гипотезами невелико и случайно, если их структура неоптимальна, т.е. не соответствует характеристикам входного сигнала. По мере поступления новых результатов измерений структура гипотез (фильтров) должна усложняться, а их весовая оценка должна быть с учетом весов гипотез на предыдущем этапе. В итоге вес гипотезы, наиболее соответствующей характеристикам полезного сигнала будет увеличиваться. Однако, с некоторого этапа этот показатель начнет снижаться, и это говорит о том, что структура оптимального фильтра пройдена. В процессе решения задачи фильтрации должен быть выбран момент оста-

новки поиска структуры, для чего может быть использован пороговый критерий. Результаты фильтрации (оценки) выдаются синхронно с моментами измерений на основе весового взвешивания выходов фильтров.

В начале из эвристических соображений выбирается критерий синтеза и класс структур, внутри которого ищется решение. Выбранный класс упорядочивается по степени сложности структуры, например порядку соответствующего уравнения [5]. Синтез начинается с рассмотрения наиболее простого ряда структур и оценки их качества по выбранному критерию синтеза. Размер этого ряда должен быть широким настолько, чтобы в его составе оказалась структура с наивысшим качеством, т.е. оптимальная на этом этапе синтеза. Вводится еще один критерий отбора структур, по которому выделяется их совокупность из области, близкой к оптимальной структуре, и меньшей по размеру, чем исходная. Для каждого элемента этой области находится соответствующий элемент из следующего, более сложного ряда структур. Для них производится операция, аналогичная описанной, и т.д. Процедура завершается на этапе, когда показатель качества оптимальной структуры будет ухудшаться с ростом числа этапов синтеза, т.е. будет найдена абсолютно оптимальная структура. В описанной процедуре используются эмпирические данные, на основе которых выбирается класс структур, критерии отбора и правило остановки эволюционного процесса.

Выбор класса фильтров. Пусть фильтрации подлежит векторная случайная последовательность $\mathbf{x}_k = [x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{mk}]^T$, где $k = 0, 1, 2, \dots$ есть дискретное время, m – размерность вектора. Измерения осуществляются посредством линейного датчика с матрицей \mathbf{H}_k размерности $m \times n$, где n – размерность сигнала на выходе датчика. Измерения происходят со случайными ошибками в виде центрированных аддитивных шумов $\mathbf{v}_k = [v_{1k}, v_{2k}, \dots, v_{nk}]^T$, в результате чего вектор измерений $\mathbf{z}_k = [z_{1k}, z_{2k}, \dots, z_{nk}]^T$ имеет вид:

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k. \quad (1)$$

Считаем, что априорные статистические характеристики воздействий \mathbf{x}_k и \mathbf{v}_k известны, но, согласно эвристическим данным, дискретный вектор \mathbf{x}_k имеет «гладкую» огибающую в смысле возможности ее аппроксимации на достаточно большом числе периодов линейными полиномами. Относительно шумов измерений полагаем, что их спектр значительно шире спектра полезного сигнала.

В условиях априорной статистической неопределенности об условиях работы, наиболее эффективным является подход на основе метода наименьших квадратов. В нем для оценки текущего состояния в виде вектора $\hat{\mathbf{x}}_k = [\hat{x}_{1k}, \hat{x}_{2k}, \dots, \hat{x}_{mk}]^T$ помимо измерений z_k используются экстраполированные значения оценки $\tilde{\mathbf{x}}_k^v = [\tilde{x}_{1k}^v, \tilde{x}_{2k}^v, \dots, \tilde{x}_{mk}^v]^T$, полученные на основе v предыдущих оценок $\hat{\mathbf{x}}_{k-i}$, $i = \overline{1, v}$. Эти значения непосредственно вводятся в состав критерия оптимальности, что определяет v -ый порядок фильтра. Квадратичный критерий оптимальной фильтрации имеет вид:

$$J_k(\hat{\mathbf{x}}_k) = (1 - \alpha)(z_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_k)^T (z_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_k) + \alpha(\hat{\mathbf{x}}_k - \tilde{\mathbf{x}}_k^v)^T (\hat{\mathbf{x}}_k - \tilde{\mathbf{x}}_k^v). \quad (2)$$

Решение уравнения оптимальности приводит к линейному фильтру наименьших квадратов

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \mathbf{K}_{1k} \tilde{\mathbf{x}}_k^v + \mathbf{K}_{0k} z_k \quad (3)$$

с коэффициентами усиления:

$$\mathbf{K}_{0k} = (1 - \alpha) [\alpha \mathbf{I} + (1 - \alpha) \mathbf{H}_k^T \mathbf{H}_k]^{-1} \mathbf{H}_k^T, \quad (4)$$

$$\mathbf{K}_{1k} = \alpha [\alpha \mathbf{I} + (1 - \alpha) \mathbf{H}_k^T \mathbf{H}_k]^{-1}. \quad (5)$$

Величина v определяет порядок фильтра и с ее ростом сложность фильтра возрастает. Параметр α зависит от неизвестного отношения сигнала к шумам и при постоянной величине v определяет разнообразие фильтров заданной структуры.

Выбор функции экстраполяции. Функцию экстраполяции $\tilde{\mathbf{x}}_k^v$ целесообразно выбирать в классе линейных полиномиальных функций для каждой составляющей. Используем один из методов экстраполяции, основанный на интерполяции последовательности $\hat{\mathbf{x}}_{k-v}; \hat{\mathbf{x}}_{k-v+1}; \hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ полиномом v -ой степени на интервале времени от $(k-v)$ до $(k-1)$. Введем относительное время $\tau = \overline{1, v}$, при котором $\tau=1$ соответствует моменту $(k-v)$; $\tau=2$ – моменту $(k-v+1)$ и т.д. до момента $\tau=v$, соответствующего моменту $(k-1)$.

Тогда оценка $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ получит обозначение: $\hat{\mathbf{x}}_{k-v} = \bar{\mathbf{x}}_1$; $\hat{\mathbf{x}}_{k-v-1} = \bar{\mathbf{x}}_2$; ... $\hat{\mathbf{x}}_{k-1} = \bar{\mathbf{x}}_v$. Экстраполированная оценка, соответствующая моменту $\tau = v + 1$, примет обозначение $\hat{\mathbf{x}}_k = \tilde{\mathbf{x}}_{v+1}$.

При сделанных предположениях экстраполированное значение оценки будет равно

$$\tilde{\mathbf{x}}_k^v = f_{v+1} = c_0 + c_1(v+1) + \dots + c_{v-1}(v+1)^{v-1}. \quad (6)$$

Коэффициенты полинома (6) находятся путем решения системы v линейных уравнений, в матричной форме имеющий вид:

$$\bar{\mathbf{x}}^v = \mathbf{A}^v \mathbf{c}^v, \quad (7)$$

где вектор оценок $\bar{\mathbf{x}}^v = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_v]^T$ и вектор коэффициентов полинома $\mathbf{c}^v = [c_0, c_1, \dots, c_{v-1}]^T$. Матрица Вандермонда \mathbf{A}^v размерности $v \times v$ имеет вид:

$$\mathbf{A}^v = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 2 & 2^2 & 2^3 & \dots & 2^{v-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ (v-1) & (v-1)^2 & (v-1)^3 & \dots & (v-1)^{v-1} \end{vmatrix}. \quad (8)$$

Решение уравнения (7) относительно вектора коэффициентов \mathbf{c}^v равно:

$$\mathbf{c}^v = (\mathbf{A}^v)^{-1} \bar{\mathbf{x}}^v. \quad (9)$$

Экстраполированное значение оценки находится из выражения (6).

Заключение. В работе принципы эвристической самоорганизации используются для решения задачи фильтрации дискретных случайных процессов при отсутствии априорных сведений об их статистических характеристиках. Отсутствие априорных данных усложняет решение задачи и делает целесообразным использование принципов самоорганизации, поскольку структура и параметры фильтра находятся из эвристических данных и текущих измерений.

Литература

1. Репин В.Г., Тартаковский Г.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. – М.: Сов. радио, 1977.
2. Куржанский А.Б. Управление и наблюдение в условиях неопределенности. – М.: Наука, 1977.
3. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. – М.: Наука, 1968.
4. Ивахненко А.Г. Системы эвристической самоорганизации в технической кибернетике. – К.: «Техніка», 1971.
5. Ивахненко А.Г., Мюллер Й.А. Самоорганизация прогнозирующих моделей. – К.: «Техніка», 1985.

УДК 681.785

МАКЕТ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ ОТРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ
 Барышникова С.Ю.¹, Кочурова Д.Н.¹, Калугин А.И.², Зарипов М.Р.², Антонов Е.А.²

¹Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова
 Ижевск, Российская Федерация

²Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук
 Ижевск, Российская Федерация

К настоящему времени большое распространение получили беспилотные летательные аппараты (БЛА) небольших размеров. Радиолокационные системы, применяемые для поиска и сопровождения крупных летательных аппаратов (самолеты и вертолеты гражданской и военной авиации), не способны обеспечить обнаружение и контроль перемещения БЛА в воздушном пространстве. Поиск и обнаружение малоразмерных летательных аппаратов могут быть реализованы за счёт применения более коротких длин волн оптического диапазона, что реализовано в лазерных локационных системах. Подобные устройства применяются также в составе современных прототипов беспилотных автомобилей и служат для обнаружения препятствий и общего сканирования окружающего пространства. Очевидно, что при изготовлении и испытании таких систем необходимо располагать данными о локационных характеристиках обнаруживаемых объектов.

Одной из таких характеристик является эффективная площадь отражения (ЭПО) – площадь некоторой плоской поверхности, расположенной нормально к направлению падающей электромагнитной волны оптического диапазона (плоской или сферической), которая, будучи помещена в точку размещения объекта, отражает такую же мощность излучения, что и данный объект [1, 2]. В связи с этим возникает задача предварительного измерения ЭПО объектов различного типа, отличающихся своей формой, размерами и совокупностью материалов, из которых они изготовлены.

ЭПО отражающей поверхности произвольной формы, расположенной на расстоянии r_1 от источника излучения площадью σ_S и на расстоянии r_2 от приёмника излучения, можно вычислить по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{1}{P_0} \iint F_S \rho(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) \frac{(\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{n})(\mathbf{r}_2 \cdot \mathbf{n})}{r_1 r_2} dS d\sigma_S, \quad (1)$$

где F_S – плотность мощности излучения, падающего на объект; r_1, r_2 – векторы направлений от источника излучения на объект и от объекта на приёмник излучения соответственно; $\rho(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$ – отражательная способность объекта в точке падения излучения; \mathbf{n} – вектор нормали к поверхности в точке падения; S – площадь отра-

жающей поверхности; P_0 – полная мощность излучения, падающего на объект.

Мощность поступающего от источника на объект излучения можно вычислить следующим образом:

$$P_0 = \frac{1}{r_1^2} \iint F_S dS d\sigma_S. \quad (2)$$

Для решения задачи экспериментального определения ЭПО авторами был предложен макет измерительного стенда, функциональная схема которого приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Функциональная схема макета стенда для измерения ЭПО

Излучение от одиночного источника (или N источников), управляемого микроконтроллером 1, через объектив 1 (или N объективов), попадает на исследуемый объект и отражается от него. При этом источники излучения, связанные с объективами образуют передающую систему в составе разработанного макета. Отраженное от исследуемого объекта излучение поступает на входную апертуру приемной системы, проходит после этого последовательно через светофильтр и объектив 2 на фотоприёмное устройство, которое преобразует поступивший на него оптический сигнал в электрический. Данный сигнал считывается с него микроконтроллером 2, обрабатывается и подается на выводное устройство.

Электроэнергия на оба микроконтроллера, а также источник излучения и фотоприёмное устройство подается с блока питания. Микро-

контроллер 1 необходим для контроля мощности источника излучения. Объектив 1 обеспечивает формирование пучка излучения с волновым фронтом требуемой формы (плоской или сферической) и пятна излучения необходимого размера на исследуемом объекте. Светофильтр необходим для выделения длин волн, соответствующих спектральному диапазону излучения источника, что способствует снижению уровня фоновых шумов по сравнению с величиной полезного оптического сигнала. Объектив 2 обеспечивает фокусировку отраженного от объекта излучения на фотоприемном устройстве. Микроконтроллер 2 выполняет статистическую обработку принятого от фотоприемного устройства сигнала, выделяя полезный сигнал с оценкой уровня фоновых шумов, и передает результат на выводное устройство, с которого информация считывается непосредственно человеком. Объект исследования, выходная апертура передающей системы и входная апертура приемной системы заключены в закрытый корпус, который исключает попадание дополнительного фонового излучения в приемную систему.

Авторами предполагается изготовление макета в двух вариантах исполнения: для измерения ЭПО объекта по отраженному излучению с плоским волновым фронтом (первый вариант) и измерения ЭПО по отраженному от объекта излучению со сферическим волновым фронтом (второй вариант). Данные варианты исполнений будут отличаться друг от друга составом передающей системы, а также взаимным расположением передающей и приемной систем и их выходных и входных апертур на корпусе макета.

Формирование пучка с плоским волновым фронтом на объекте исследования в первом варианте исполнения предполагается обеспечить за счет применения в составе передающей системы лазерного источника с коллимирующим объективом, который снизит величину расходимости лазерного излучения и позволит приблизить форму волнового фронта пучка к плоской на расстояниях около 1 метра от выходной апертуры передающей системы. Однако в таком случае размер пятна на объекте будет ограничен размером последнего оптического элемента коллимирующего объектива. При этом сам объект по своим габаритным размерам может превышать сформированное на нем лазерное пятно, что в свою очередь приведет к недостоверным результатам определения ЭПО объекта. Для полного охвата поверхности исследуемого объекта падающим излучением предлагается пятно излучения сформировать в виде совокупности лазерных пятен, создаваемых на объекте несколькими N лазерными источниками с коллимирующими объективами. При этом каждый

источник имеет гауссово распределение плотности мощности, и в результате размещения источников на определенном расстоянии друг от друга и сложения пучков на поверхности исследуемого объекта сформируется общее пятно с распределением плотности мощности, близким к равномерному (рисунок 2).

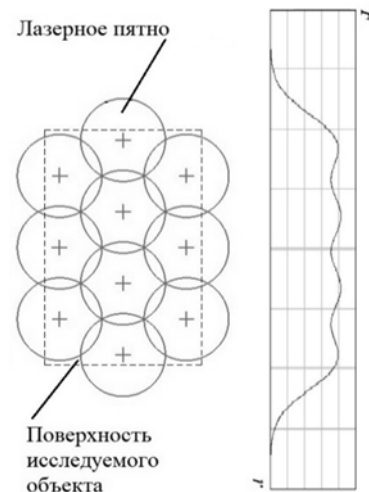


Рисунок 2 – Расположение лазерных источников и вид формируемого ими распределения плотности мощности F вдоль координаты r

Во втором варианте макета для создания сферического волнового фронта излучения на объекте исследования предполагается использование в составе передающей системы одного лазерного источника с гауссовым распределением плотности мощности и отрицательного объектива, формирующего пучок высокой расходимости, что позволит полностью охватить объект лазерным пятном. При этом оптические оси передающей и приемной систем совпадают.

Предлагаемый авторами макет позволит провести измерения ЭПО в широком спектральном диапазоне оптического излучения (от ультрафиолетовой области до средней области инфракрасного излучения). Это может быть обеспечено путем замены лазерных источников излучения и фотоприёмного устройства в составе макета и применения при необходимости соответствующих систем формирования пучка и приема обратно отраженного излучения.

Литература

1. Барышникова С.Ю., Карпиков Б.Н., Калугин А.И., Зарипов М.Р. Измерение эффективной площади отражения сложных объектов // IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике Сборник научных трудов. – Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ. Москва, 2020. – С. 459–460.

2. Wyman P.W. Definition of Laser Radar Cross Section. Applied optics, 1968, vol. 7, iss. 1, p. 207, doi: 10.1364/AO.7.000207.

УДК 53.082.52

**ПРИБОР ДЛЯ ПОДВОДНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ УФ-ОБЛУЧЕННОСТИ ВОДНЫХ СРЕД PIONDEER
Борисовец А.Д., Дёмин В.С.**

*Учреждение БГУ «Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы»
Минск, Республика Беларусь*

Введение. Мировой опыт исследования влияния УФ-излучения на морские и пресноводные экосистемы позволяет считать, что в случае изменения интенсивности солнечного УФ-излучения будут нарушены многие механизмы функционирования водных экосистем, что неизбежно приведет к отрицательным последствиям, как в локальном, так и в глобальном масштабе [1]. Изменение интенсивности солнечного УФ-излучения, вызванное атмосферными факторами, такими, как разрушение озонового слоя, возникновение озоновых аномалий, увеличение количества аэрозолей или присутствие в атмосфере увеличенного облачного покрова, влияет на количество УФ-излучения в воде. Также стоит учитывать, что определенные компоненты, содержащиеся в воде, могут сильно поглощать ультрафиолетовое излучение, например, растворенное органическое вещество или гуминовые вещества. Изменённое воздействие УФ-излучения скажется на росте и размножении водных организмов, например, УФ-излучение способствует уничтожению бактериальной микрофлоры, что, в свою очередь, отражается на продуктивности водных экосистем и выходе полезного для человека продукта. Географическая и сезонная изменчивость проникновения УФ-излучения также имеет важное экологическое и производственное значение. Таким образом, можно говорить об актуальности дальнейших углубленных исследований влияния УФ-излучения на водные экосистемы разных типов.

Цель. Целью работы являлось конструирование погружного прибора для измерений УФ-излучения на глубинах до 50 м и проведение испытаний. Использование прибора предполагалось в водных средах озёр Нарочанской группы, а также в полярных регионах. Разработкой приборов данного типа в мире занимается несколько компаний, например, Biospherical Instruments Inc. [2].

Конструкция прибора. В 2012 году в Национальном научно-исследовательском центре мониторинга озоносферы БГУ в рамках ГПНИ «Природно-ресурсный потенциал 3.01» были разработаны технические требования к погружной системе и ее конструкция, а также изготовлен экспериментальный образец погружного прибора. PionDeer представляет собой ультрафиолетовый радиометр и предназначен для исследования вариаций ультрафиолетового излучения в водном слое на глубинах до 50 м.

Включает в себя погружную и надводную часть, одновременные результаты измерения которых накапливаются на карте памяти (SD). Для оперативной оценки результатов предусмотрен также вывод результатов текущих значений уровней УФ-излучения на цифровой дисплей. Надводный модуль служит для обмена данными с подводным блоком, сбора и сохранения результатов измерений. В состав электронной части входит GSM модуль SIM868 для определения координат и фиксации точки проведения измерений. Внешняя передача данных, настройка прибора и визуализация процесса измерения происходит при помощи приложения на смартфоне или планшете через интерфейс Bluetooth 4.0. Герметичность модуля обеспечивается пятью уплотнительными кольцами в верхней и нижней крышках корпуса. В качестве входного объектива излучения для погружной части прибора был выбран широкоугольный кварцевый объектив типа «рыбий глаз» с косинусной характеристикой чувствительности. Кварцевая линза герметично фиксируется в корпусе, в котором для коррекции угловой характеристики чувствительности предусмотрена возможность установки тефлоновых рассеивателей и фильтровых насадок. Конструкция объектива позволяет измерять как мощность солнечного излучения на различных глубинах, так и прозрачность водного слоя в диапазоне 285–400 нм. Дополнительное использование фильтровых насадок позволяет ограничить диапазон биологически активным УФ-Б излучением (285–315 нм). В качестве фотодетектора используется солнечно-слепой фотоэлектронный умножитель ФЭУ-142. Для передачи данных от погружного модуля к надводному используется катушка с кабелем. В прибор также установлен ряд дополнительных датчиков: датчик температуры воды, датчик давления глубины, датчик протечки корпуса. Внешний вид надводной части прибора PionDeer представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид надводной части

Внешний вид погружной части прибора PionDeer представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Внешний вид погружной части

Испытания. В процессе лабораторных испытаний погружная часть прибора проверялась на герметичность с использованием стальной герметичной камеры, заполненной водой, в которую помещался погружной модуль. При помощи компрессора внутри испытательного объёма создавалось избыточное давление в 5 атм., что соответствует глубине погружения до 50 м. По результатам проведенных испытаний можно утверждать, что погружной модуль полностью герметичен и выдерживает давление на требуемых глубинах. В сентябре 2013 г. были проведены натурные испытания прибора. Основная цель испытаний заключалась в проверке работоспособности прибора в реальных условиях, проверке чувствительности прибора к УФ-излучению на разных глубинах, герметичности и надежности конструкции. По результатам натурных испытаний прибора можно заключить, что чувствительности прибора более чем достаточно, чтобы измерять уровни УФ-излучения под водой, герметичность прибора не нарушается, а конструкция прибора надежна. Важно отметить, что результаты, полученные во время натурных испытаний, свидетельствовали о наличии вполне регистрируемых интенсивностей УФ-излучения на достаточно больших глубинах, что стимулировало дальнейшие исследования.

Исследования. С 2014 г. проводятся регулярные измерения уровней УФ-облученности озёр Нарочанской группы с использованием прибора PionDeer [3]. PionDeer будет задействован в исследованиях в рамках 13-й Белорусской Антарктической экспедиции.

Модернизация. В 2020 году был произведен ряд доработок прибора PionDeer. Был внедрён датчик для измерения концентрации растворенного в воде кислорода одновременно с измерениями УФ облученности. Необходимость в данных измерениях объясняется тем, что большинство химических и биологических процессов влияют на содержание растворенного в воде кислорода. Уровень растворенного кислорода в воде имеет важное значение для комплексной оценки его экологического состояния. Были пересмотрены и улучшены методы герметизации погружной части, что позволило увеличить максимальную глубину погружения с 30 до 50 метров, время автономной работы прибора с 4 до 10 часов. После произошедших изменений прибор вновь прошёл лабораторные испытания. Основные характеристики PionDeer представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики PionDeer

Напряжение питания, В	10–15
Потребляемая мощность, Вт	10
Время непрерывной работы, ч	10
Глубина погружения, м	До 50
Ошибка определения глубины, см	±5
Спектральный диапазон, нм	285–400 (285–315)
Скорость передачи данных, кбит/с	500
Масса с катушкой и кабелем, кг	15,7
Линейные размеры, см	24×24×52
Рабочий диапазон температур, °С	от –15 до 50

Выводы. В НИИЦ МО БГУ был сконструирован прибор для измерений УФ-излучения на глубинах до 50 м. Прибор прошёл лабораторные и натурные испытания. С 2014 г. с использованием PionDeer проводились измерения уровней УФ-облученности озёр Нарочанской группы. В 2020 году была проведена модернизация с целью увеличения числа исследований, возможных для проведения с использованием PionDeer.

Литература

1. Kjeldstad B. (2006) Underwater Radiation Measurements: Consequences of an Increased UV-B Radiation. In: Ghetti F., Checcucci G., Bornman J.F. (eds) Environmental UV Radiation: Impact on Ecosystems and Human Health and Predictive Models. Nato Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences, vol 57. Springer, Dordrecht.
2. Biospherical Instruments Inc.: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biospherical.com>. – Дата доступа: 20.09.2020.
3. Результаты измерений уровней УФ-облученности поверхности и водной среды озер Нарочанской группы. / Л.Н. Турышев [и др.] // Бюллетень экологического состояния озер Нарочь, Мясотро, Баторино. – 2018. – С. 70–87.

УДК 620.179.142.6

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ СТАЛЬНОГО КОРПУСА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО ТОЛЩИНОМЕРА НА КРАЕВОЙ ЭФФЕКТ

Булатов О.В.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

Введение. Краевой эффект во многих случаях становится одним из основных факторов, снижающих точность измерений толщины покрытия. Так как при магнитодинамической толщинометрии данный фактор в немалой степени зависит от геометрических параметров стального цилиндрического корпуса преобразователя, целесообразно осуществить их оптимизацию при разработке конструкции толщиномера.

Из общих соображений следует, что сильное влияние на краевой эффект должна оказывать толщина вертикальной стенки корпуса магнитодинамического преобразователя [1]. В связи с этим целью настоящей работы стал поиск значения данной толщины, оптимального для толщинометрии никелевого покрытия на неферромагнитном основании.

Как правило, толщина никелевого покрытия промышленных изделий не превышает 100 мкм. Одним из исключений является камера жидкостного ракетного двигателя: в этом случае покрытие может иметь толщину вплоть до 700 мкм. Так как с увеличением толщины никелевого покрытия краевой эффект возрастает, в данной работе исследована его зависимость от толщины стенки корпуса преобразователя при большем из двух указанных значений. Исследование проведено методом конечных элементов в пакете прикладных программ FEMM [2], предназначенном для работы с осесимметричными моделями.

Методика и результаты исследования. Расчетным аналогом информативного сигнала магнитодинамического преобразователя является информативный поток F_E , представляющий собой разность двух магнитных потоков, проходящих через контур центрального витка измерительной обмотки преобразователя в его начальном и конечном положениях относительно покрытия. С другой стороны, поток F_E можно выразить через изменение ΔB_n нормальной составляющей магнитной индукции, обусловленное удалением преобразователя от покрытия на условно бесконечное расстояние:

$$F_E = \Delta B_n S, \tag{1}$$

где S – площадь плоской поверхности, ограниченной центральным витком обмотки.

Так как информативный сигнал формируется всеми витками обмотки, охватывающими стальной полюсный наконечник, сопряженный с постоянным магнитом преобразователя, в первую очередь исследована зависимость величины B_n ср

(нормальной составляющей магнитной индукции, усредненной по всему объему материала наконечника) от расстояния между краем никелевого покрытия и точкой контакта наконечника с покрытием, расположенной на оси симметрии преобразователя (это расстояние равно радиусу R никелевого диска, заменившего собой покрытие при компьютерном моделировании). Графики зависимостей B_n ср(R) и B_n ср(H) приведены на рисунке 1.

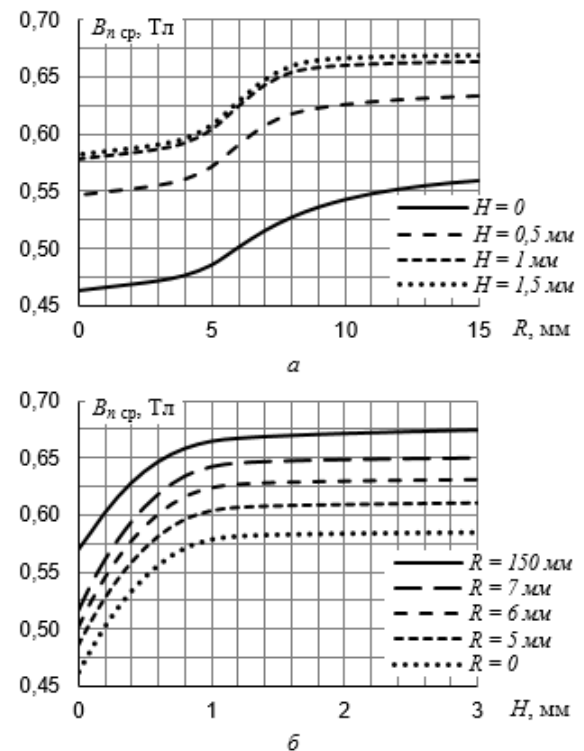


Рисунок 1 – Зависимость величины B_n ср от радиуса R никелевого диска толщиной 700 мкм (а) или от толщины H вертикальной стенки цилиндрического корпуса магнитодинамического преобразователя (б)

Из формулы (1) следует, что влияние толщины H на краевой эффект можно также оценить по изменению нормальной составляющей B_n в материале наконечника на уровне центрального витка обмотки, имеющего радиус 6 мм и расположенного на расстоянии 2,5 мм от поверхности диска. В связи с этим на рисунке 2 показано радиальное распределение B_n в наконечнике при разной H .

Количественная оценка краевого эффекта основывалась на анализе влияния радиуса R на поток F_E . Краевой эффект считался значительным только при выполнении условия $R < R_{из}$ (последняя величина является радиусом информативной

зоны преобразователя). О достижении равенства $R = R_{из}$ свидетельствовало двухпроцентное изменение потока F_E , так как оно соответствует основной допускаемой погрешности толщиномеров МТЦ [1], причем исходным было значение F_E , вычисленное при считавшемся бесконечным $R = 150$ мкм. При таком подходе получена зависимость $R_{из}(H)$, изображенная на рисунке 3.

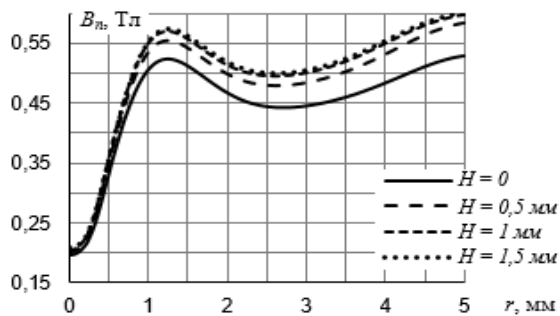


Рисунок 2 – Распределение нормальной составляющей B_n магнитной индукции в материале наконечника диаметром 5 мм по радиальной координате r

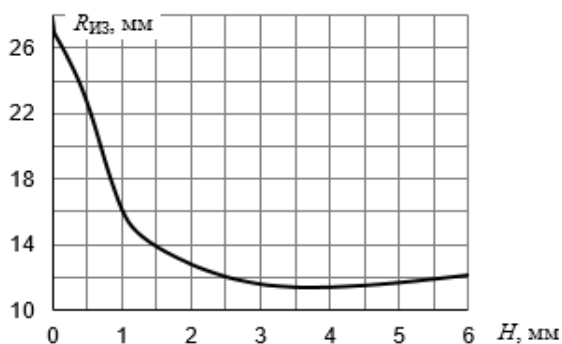


Рисунок 3 – Зависимость радиуса $R_{из}$ информативной зоны преобразователя от толщины H вертикальной стенки его корпуса

Анализ результатов исследования. По графику на рисунке 1, а видно, что приближение радиуса R к нулю приводит к существенному уменьшению величины $B_{n, ср}$, наиболее заметному в том случае, когда край никелевого диска проходит под двухмиллиметровым воздушным зазором между наконечником и стенкой корпуса, так как именно здесь в никеле наиболее сконцентрированы силовые линии магнитной индукции. Значительное возрастание $B_{n, ср}$ при утолщении стенки корпуса, наблюдаемое вплоть до $H = 1$ мм, объясняется резким увеличением концентрации указанных линий в материале стенки, что в конечном итоге приводит к существенному увеличению магнитной индукции в материале наконечника. В целом же первый график свидетельствует о том, что магнитодинамический преобразователь становится очень чувствительным к изменению R , когда сужающийся край диска доходит до стенки корпуса.

По взаимному расположению линий на втором графике видно, что величина $B_{n, ср}$ начинает существенно уменьшаться только при $R < 10$ мм (этим подтверждается достоверность первого графика), а по их характеру – что $B_{n, ср}$ при любом R очень сильно зависит от толщины H , пока последняя не превысит 1 мм. Дальнейшее увеличение H практически не приводит к росту $B_{n, ср}$, поскольку концентрация силовых линий магнитной индукции в материале стенки корпуса уже почти не возрастает. Следовательно, для значительного снижения краевого эффекта стенка корпуса должна быть достаточно толстой.

Минимум функции $B_n = f(r)$ при $r = 0$ на рисунке 2 объясняется наличием шарика диаметром 2,5 мм, предотвращающего износ наконечника и выполненного из закаленной подшипниковой стали, которая по магнитной проницаемости существенно хуже незакаленной низкоуглеродистой стали наконечника. Также видно значительное влияние H на B_n при $H < 1$ мм, подтверждающее важность выбора оптимального значения этой толщины.

Для практики наибольший интерес представляет график, изображенный на рисунке 3. В отличие от предыдущих графиков, здесь уже можно выбрать оптимальное значение H , при котором краевой эффект будет минимальным. Как и следовало ожидать, величина $R_{из}$ стремительно убывает только до $H \approx 1$ мм, а дальше ее зависимость от H быстро ослабевает и, начиная с $H \approx 3$ мм, оказывается практически несущественной. Далее функция $R_{из} = g(H)$ плавно достигает минимума при $H = 3,7$ мм, а затем наблюдается тенденция слабого возрастания $R_{из}$, которая и должна иметь место при увеличении внешнего диаметра корпуса.

Заключение. Расчетные данные, полученные в настоящей работе, свидетельствуют о сильном влиянии толщины вертикальной стенки стального корпуса магнитодинамического преобразователя на краевой эффект. Кроме того, они позволяют утверждать, что для минимизации краевого эффекта указанная толщина должна быть достаточно большой, но не избыточной. График на последнем рисунке показывает, что при толщиномерии никелевого покрытия на неферромагнитном основании оптимальной является стенка толщиной 3,7 мм, однако на практике можно использовать преобразователь, корпус которого имеет более тонкую стенку (толщиной 2,5–3 мм).

Литература

1. Лухвич А.А. Магнитные толщиномеры нового поколения / А.А. Лухвич // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2010. – № 4. – С. 3–15.
2. Finite element method magnetics. Version 4.2 [Electronic resource]: user's manual. – Mode of access: <http://www.femm.info/wiki/Files/files.xml?action=download&file=manual.pdf>. – Date of access: 09.10.2020.

УДК 620.179.17

**ПОРТАТИВНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА УСТАЛОСТЬ
ОБРАЗЦОВ СТАЛИ 09Г2С, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**
Бусько В.Н.¹, Венгринович В.Л.¹, Винтов Д.А.¹, Ничипурук А.П.², Шашков А.Н.²

¹Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

²Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН
Екатеринбург, Россия

В последнее время в различных отраслях промышленности (машиностроение, авиастроение, космонавтика, ракетостроение, оборонный комплекс, строительство, стоматология, биомедицина) происходит постепенная замена деталей и изделий, изготовленных с помощью традиционных способов (литьё, прокат, ковка, штамповка, фрезерование) на полученные с помощью аддитивных технологий (АТ). По сути АТ – это инновационные технологии, основанные на изготовлении различных высокоточных изделий способом послойного синтеза материалов с использованием компьютерных моделей и 3D-печати. При этом достигается возможность получить материал, который часто нельзя изготовить традиционными способами [1]. По мнению ряда авторов, стальные материалы, полученные с помощью АТ, обладают повышенными прочностными свойствами [2–4].

Однако в настоящее время физико-механические свойства (ФМС), в т. ч., прочностные и надёжность изделий материалов, полученных с помощью цифрового производства и 3D-печати, пока мало изучены (экспериментальные данные практически отсутствуют). Известных систематических данных по влиянию внешних циклических (повторно-переменных) нагрузок, ФМС, способов и режимов получения изделий на закономерности усталостного разрушения также недостаточно (практически не обнаружено).

Для исследования изменения механических свойств и оценки сопротивления усталости образцов стальных материалов, полученных с помощью АТ, необходимо проводить стандартные механические испытания при циклических нагрузках.

Сложность и отличия испытания и исследования УД таких материалов от полученных обычным путём обусловлены рядом особенностей, наиболее важными из которых являются:

– как правило, готовый продукт или образцы, имеют малые размеры и габариты (длиной до $\approx 30\text{--}80$ мм и толщиной 1–2 мм), возможно также появление анизотропии, остаточных напряжений, зон их концентрации и т.д., которые ярче проявляют себя относительно, например, литья;

– возникающие при производстве и эксплуатации за счёт пластической деформации изделий дефекты в виде трещин, пор, несплошностей, включений, несплавлений, также имеют конечные малые размеры – значительно меньшие, чем

в образцах, полученных традиционными способами, что влечёт за собой использование несколько иного оборудования и методики испытаний и изучения таких материалов.

Обычно для механических испытаний и исследования УД стальных образцов используют промышленные установки, стенды, машины или дорогостоящее импортное оборудование. Однако их высокая стоимость, габариты, дороговизна обслуживания и др. ограничивают их использование.

В связи с этим, а также масштабным фактором и несовершенством микроструктуры получаемых с помощью металлических 3D-принтеров образцов, отсутствием данных по взаимосвязи условий циклического нагружения с УД, актуальным и необходимым является создание портативного, простого и универсального испытательного стенда с «мягкими» условиями испытаний.

Цель работы – создать макет портативного стенда-установки для проведения циклических механических испытаний и изучения прочностных характеристик образцов стальных материалов, полученных с помощью АТ и литья.

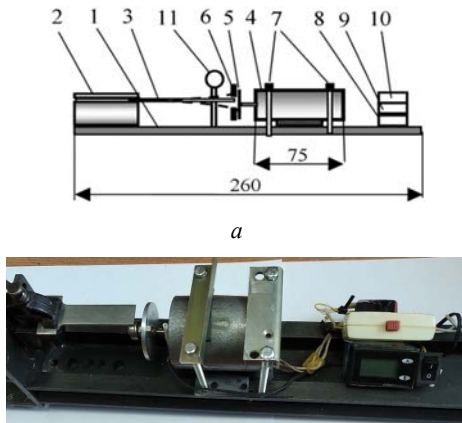
За основу предложенного и созданного портативного стенда-установки использованы принцип и схема формирования циклических напряжений в плоском консольно закреплённом ферромагнитном образце при изгибе [5]. Сущность работы установки основана на механическом воздействии одночастотного циклического нагружения на свободный конец консольно закреплённого образца с использованием электродвигателя и силовозбудителей в виде подшипников качения.

На рисунке 1 показана упрощённая видоизменённая под условия эксперимента схема портативной установки для исследования УД при циклических механических испытаниях.

В качестве электродвигателя использовался универсальный асинхронный двигатель типа УАД-34 однофазного включения в сеть переменного тока напряжением 220 В частотой 50 Гц, развивающий номинальную мощность 2 Вт с частотой вращения вала 1280 об./мин с внешними размерами корпуса длиной 75 мм и $\varnothing 50$ мм. Размеры портативного стенда – 260×70 высотой 80 мм, вес – около 4 кг.

Для проведения циклических механических испытаний на УД были изготовлены плоские образцы методом селективного лазерного сплавления (СЛС). Исходным компонентом для изготов-

ления образцов был порошок малоуглеродистой стали 09Г2С с размером фракции 10–45 мкм. Размеры образцов соответствовали ГОСТ 25.502-79: длина 150 мм, толщина 15 мм, ширина в средней части – 15 мм, в галтельной – 30 мм. Размеры и форма образцов позволяли проводить испытания на УД с применением различных видов формирования циклических напряжений.



б

Рисунок 1 – Упрощенная блок-схема макета портативного стенда для циклических механических испытаний УД образцов материалов, полученных с помощью АТ (а) и фотография внешнего вида (б):

1 – основание; 2 – узел защемления образца; 3 – образец; 4 – электродвигатель (ЭД) с герконом; 5 – диск; 6 – силовоз будители; 7 – болты крепления; 8 – электронный счётчик оборотов (ЭС); 9 – батарея «Крона»; 10 – выключатели питания ЭД и ЭС; 11 – индикатор прогиба

Для сравнения свойств также были изготовлены образцы из стали 09Г2С, изготовленные «традиционным» методом при помощи литья. Исходные образцы были разрезаны по толщине на электроэрозивном станке. В итоге получились образцы толщиной 2 и 10 мм (рисунок 2).



Рисунок 2 – Фотография образцов из стали 09Г2С, полученных с помощью АТ и литья, для механических испытаний на циклическую прочность

Поверхности всех образцов подвергались шлифованию вдоль оси абразивным камнем с малой подачей и водяным охлаждением. Для снижения остаточных напряжений в 3D образцах, неизбежно образующихся в процессе изготовления, они подвергались отжигу и нормализации. Характеристики образцов и режимы термической обработки представлены в таблице 1.

После резки пополам по длине образцов на описанном выше стенде появляется возможность

проводить циклические испытания образца при изгибе на УД с консольно закреплённым одним и вторым свободным концом.

Таблица 1 – Характеристики образцов 3D-материалов и после литья для механических испытаний и исследований усталостной прочности*

№№, п/п	Толщина образца, мм	Способ изготовления	Режим т/о
1	2	3D (СЛС)	Отжиг 350°C, 3 часа
2	10	3D (СЛС)	Отжиг 350°C, 3 часа
3	2	3D (СЛС)	Отжиг 350°C, 3 часа + нормализация 980°C, 0,5 часа, охлажд. на воздухе
4	10	3D (СЛС)	Отжиг 350°C, 3 часа + нормализация 980°C, 0,5 часа, охлажд. на воздухе
5	2	литьё	нет
6	10	литьё	нет

*Образцы изготовлены в ИФМ им. М.Н. Михеева УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия)

Предварительные испытания изготовленного макета портативного лабораторного стенда-установки показали работоспособность и возможность использования для проведения циклических механических испытаний образцов стали 09Г2С, полученных с помощью литья и аддитивных технологий, и изучения особенностей сопротивления усталости.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке совместного проекта между БРФФИ (грант № Т20Р – 119) и РФФИ (проект №20-58-00015 Бел_а).

Литература

1. Чижик С.А. Аддитивные технологии: состояние и перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь // Матер. НТК «Аддитивные технологии, материалы и конструкции», 5–6.10.2016, г. Гродно. – С. 3–4.
2. Алёшин Н.П., Григорьев М.В., Щипаков Н.А. и др. Применение методов неразрушающего контроля для оценки качества деталей непосредственно в процессе аддитивного производства // Дефектоскопия, 2016. – № 9. – С. 64–71.
3. Горбовец М.А., Евгенов А.Г., Беляев М.С., Васильев Д.А. Усталостные характеристики литейных жаропрочных никелевых сплавов, полученных методом селективного лазерного сплавления // Матер. III между. научн. конф. «Аддитивные технологии: настоящее и будущее», М. 23.03.2017. ВИАМ.
4. Чемодуров А.Н. Применение аддитивных технологий в производстве изделий машиностроения // Известия ТулГУ. Технич. наук. – 2016, вып. 8, ч. 2. – С. 210–217.
5. Бусько В.Н. Лабораторная установка для исследования усталостной повреждаемости плоских ферромагнитных образцов // Приборы и техника эксперимента, 2011. – № 1. – С. 165–167.

УДК 004.932.2

ЛОКАЛИЗАЦИЯ АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ВИДЕОРЕГИСТРАТОРА

Боровская О.О., Галузо В.Е., Коваль А.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь*

Локализация является неотъемлемым атрибутом системы навигации и реагирования автономного транспортного средства (АТС). Значительное число методик решения данной задачи использует данные видеорегистраторов и встроенных камер, LIDAR-ов, радаров и прочих средств получения информации. Подходы, базирующиеся на видеоданных получили особое распространение в силу простоты получения исходных данных и широкого спектра инструментов доступных для обработки видеопотока и отдельных кадров.

Для распознавания линий дорожной разметки и определения положения АТС на основе данных видеорегистратора необходимо решить несколько задач:

- откалибровать камеру видеорегистратора;
- применить корректирующие операции в отношении изображения с видеорегистратора для того, чтобы максимально повысить качество изображения;
- применить пространственную трансформацию изображения, для того, чтобы получить развертку изображения дороги (вид сверху);
- распознать линии дорожной разметки для определения границы полосы движения;
- рассчитать кривизну дороги и радиус поворота на заданном участке пути;
- спроецировать полученную информацию на исходное изображение.

Для калибровки камеры необходимо рассчитать коэффициенты трансформации и применить их к выходному изображению. Коэффициенты определяется путем расчёта кривизны линий на различных участках изображения при фотографировании объектов с заведомо прямыми линиями.

Используемая в сфере компьютерного зрения программная библиотека OpenCV [1] позволяет выполнять такие операции максимально просто, и для этого необходимо:

- распечатать предложенный шаблон с изображением шахматного узора;
- сделать серию фотографий распечатки на целевое фотоустройство под разными углами и с разными перспективными проекциями;
- рассчитать положение линий, образуемых шахматным узором при помощи метода библиотеки `cv2.findChessboardCorners`;
- передать полученные данные в метод `cv2.getOptimalNewCameraMatrix` для создания матрицы трансформации, валидной для конкретной камеры.
- выполнить метод `cv2.calibrateCamera`, предоставив данные матрицы трансформации.

– поступающие изображения трансформировать посредством вызова метода применения сохраненных коэффициентов.

Используя рассчитанные коэффициенты и параметры калибровки камеры, можно применить аналогичные преобразования к реальным изображениям, полученным с видеорегистратора АТС. Это позволит избавиться от искажений и позволит более точно анализировать кривизну дороги на участке пути и положение АТС относительно полосы движения.

Следующим этапом является подготовка изображения к процессу распознавания линий дорожной разметки, определение полосы движения и последующему анализу данной информации для получения сведений о расположении АТС относительно дороги [2].

Для того, чтобы максимально точно выявить линии дорожной разметки необходимо воспользоваться подходом, основанным на знаниях о том, что линии дорожной разметки являются относительно прямыми и протяженными. Следовательно, если рассматривать подобные элементы на изображениях, они будут представлять собой протяженные участки резких градиентов.

Таким образом, распознав устойчивые паттерны изменения градиента, можно получить среди прочих контуры линий дорожной разметки. Для проверки устойчивости паттерна необходимо использовать поиск градиентов для горизонтального направления, вертикального направления, направления, близкого к 45° (135°), а также для нормализованной величины, представляющей величину градиента по обоим направлениям сразу. Поиск градиентов выполняется с помощью оператора Sobel библиотеки OpenCV [3] на черно-белом изображении, для того, чтобы получить сведения о контурах видимых объектов.

В то же время, для того, чтобы учесть контуры объектов, различающихся по цвету, произведем поиск градиентов в пространстве HSL (Hue-Saturation-Lightness) по компонентам H и S, т. к. именно они отвечает за различия оттенков цветов и их насыщенности, в то время, как компонента L может варьироваться в зависимости от условий освещенности объекта, что будет слабо коррелировать с, непосредственно, контурами искомым объектов.

Спроецировав все точки, прошедшие фильтры, получим картину, отражающую большинство конвидимых контуров объектов. Применив цветовую кодировку для подсветки точек прошедших

конкретный фильтр, можно заметить, насколько эффективно использование нескольких типов фильтров для одного и того же изображения, т.к. особенности видимых границ объектов воспринимаются разными фильтрами по-разному. Объединение результатов способствует уменьшению общего количества шума в результатах.

Следующим этапом является обработка изображения с точки зрения перспективной развёртки, с целью получения «вида сверху» участка дороги, обозримого в поле зрения видеорегистратора. Для этого необходимо с учётом местоположения видеорегистратора в автомобиле произвести преобразование на основе трапеции перспективы. Для получения конкретных координат удобно воспользоваться имеющимся снимком прямолинейного участка пути. Тогда, сопоставив ребра трапеции с линиями дорожной разметки, можно получить достаточно точные координаты требуемой проекции.

Используя впоследствии полученную матрицу трансформации для участков пути с изгибом, можно извлекать сведения о радиусе поворота на основе данных о кривизне дорожной разметки. Применяя данную развёртку наряду с объединёнными фильтрами изображений, мы получим множество точек, которые можно аппроксимировать в кривую на основе данных об их распределении. Метод основан на технике фреймов, когда для каждого горизонтального сегмента изображения выполняется поиск точки с пиковым распределением количества видимых точек. В случае, если несколько фреймов расположено рядом, то это будет оказывать влияние на последующий поиск фреймов, повышая коэффициент вероятности для близлежащих участков. Для реализации данного алгоритма были задействованы метод `polyfit` библиотеки `numpy`. Полученная кривая достаточно репрезентативно позволяет

судить о радиусе кривизны дороги и смещении АТС относительно центра полосы движения.

Зная стандарт ширины полосы движения и ширину видимого участка полосы движения в пикселях на полученном изображении, можно рассчитать соотношение, определяющее, сколько метров реального пространства приходится на видимые пиксели. Для данных тестового видеоряда соотношение получилось равным 0,0052 м/пиксель для горизонтального направления и 0,0414 для вертикального. Эти данные позволяют рассчитать смещение АТС относительно центра полосы движения, а также радиус кривизны поворота текущего участка пути.

Используя эти данные, можно обеспечить практически в режиме реального времени АТС сведениями о его локализации относительно дороги и элементов дорожной разметки.

Таким образом установлено, что на основе данных видеорегистратора и техник компьютерного зрения, существует реальная возможность частичного решения задачи локализации АТС.

Дальнейшее развитие данной модели может лежать в плоскости адаптации алгоритма к различным условиям освещённости местности и обработки прочих объектов, попадающих в поле зрения видеорегистратора.

Литература

1. Camera Calibration With OpenCV [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/calib3d/camera_calibration/camera_calibration.html. Дата доступа: 06.04.2020.
2. Advanced Lane Finding Project [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://github.com/kav137/CarND-Advanced-Lane-Lines>.
3. Sobel Derivatives [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/imgproc/imgtrans/sobel_derivatives/sobel_derivatives.html.

УДК 004.056

ЗАЩИЩЁННОСТЬ ИНФРАСТРУКТУРЫ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Глинская Е.В.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Москва, Российская Федерация*

После определения угроз информационной безопасности следует перейти к подробной оценке защищённости системы передачи данных от информационных угроз.

Данная методика предполагает несколько последовательных этапов определения защищённости инфраструктуры передачи данных, которые следует выполнять в определённом порядке по ряду соображений, изложенных непосредственно в описании этапов.

Этап 1. Составление списка сетей передачи данных.

Поскольку угрозы информационной безопасности определяются на высоком уровне разработки системы, в них может быть не отражено реальное разделение инфраструктуры передачи данных [1].

На данном этапе необходимо разобрать всю систему передачи информации ВС, так же как и систему передачи информации от ВС к назем-

ным службам и обратно. Разделение следует производить на основании:

– Физических показателей: подсистема представляет собой ряд соединённых на физическом уровне (проводами, физическими адресами беспроводных устройств) узлов.

– Логических показателей: подсистема представляет собой объединение узлов, выполняющих одну функцию, информация, передающаяся в системе, служит конкретной цели.

– При этом следует обратить внимание на следующие моменты:

– Замкнута ли система передачи данных, или имеет шлюз, через который информация переходит из одной подсистемы в другую?

– Находятся ли все каналы передачи данных системы в помещении одного уровня доступа?

– Имеет ли система или её узлы резервирование по мощностям или по физическим каналам передачи?

– Имеет ли канал передачи физическую защиту в электромагнитной или шумовой области?

– Передаёт ли система информацию только одного типа, или является многозадачной?

Ответы на эти вопросы потребуются на последующих этапах. Результатом этапа 1 должен стать список сетей передачи данных с их детальными характеристиками.

Этап 2. Соотнесение списка сетей категориям.

Данные этапа 1 необходимо систематизировать, разбив все сети передачи данных на ряд категорий, представленных в таблице 1.

Таблица 1 – Категории сетей передачи данных

Сеть физически обособлена?	Сеть логически обособлена?	Категория сети передачи данных
Да	Да	1
Нет	Да	2
Да	Нет	3
Нет	Нет	4

Для каждой категории сети передачи данных в соответствие следует поставить общий коэффициент защиты. Соответственно, ниже следуют описания категорий:

– Категория 1: полностью закрытая сеть. Отсутствие переходов на физическом уровне обеспечивает защиту, а передача информации только одного типа – удобство шифрования и способность определения строгих норм безопасности на уровне всей сети. Базовый коэффициент защищённости сети $K_6 = 1$.

– Категория 2: сеть пользуется транзитными механизмами при передаче информации, но источник и приёмник информации всё ещё логически объединены. Это значит, что существует возможность зашифровать всю идущую информацию, оставляя открытой только небольшую сетевую часть потока данных, нужную для прохождения через маршрутизаторы. Для данной кате-

гории базовый коэффициент защищённости будет составлять $K_6 = 1,1$.

– Категория 3: физически обособленная сеть, по которой передаётся информация разных типов. При этом за счёт жёсткой привязки источников и приёмников информации можно достичь защищённости от несанкционированного вторжения. В таком случае $K_6 = 1,15$.

– Категория 4: распределённая сеть общего пользования. По сети, устройства которой подключаются в динамическом порядке и находятся в разных по уровню доступа местах, ходит информация разных классов защиты и разной степени важности. В данном случае проблема шифрования осложнена разнородностью сети, как в плане оборудования, так и в плане информации. Коэффициент защищённости такой сети $K_6 = 1,2$.

Здесь более высокий коэффициент означает меньшую защищённость инфраструктуры передачи данных.

Данные коэффициенты будут использоваться в качестве весовых коэффициентов для расчёта защищённости сети, но для этого сначала их необходимо дополнительно скорректировать. Это происходит на следующем этапе.

Этап 3. Введение коэффициентов для категорий.

Помимо введённых на этапе 2 категорий существует ряд независимых параметров, определяющих степень защищённости любой сети [2]. Эти параметры являются ответами на вопросы, поставленные на этапе 1. Они определяют дополнительные весовые коэффициенты, которые суммируются с базовым коэффициентом защищённости. Вводимые коэффициенты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Корректирующие коэффициенты

Свойства безопасности	Изменения K_6 в зависимости от свойства	
	Выполняется	Не выполняется
Замкнутость системы	-0,1	+0,05
Изолированность сети	-0,1	+0,05
Резервирование	-0,05	+0,1
Защита	-0,15	+0,1
Многозадачность	+0,1	-0,05

После проверки коэффициента K_6 на соответствие каждому из указанных в таблице 2 свойств безопасности результирующий коэффициент обозначается базовым коэффициентом сети – $K_{6с}$. Чем он ниже – тем лучше безопасность данной конкретной сети передачи данных.

Этап 4. Выбор угроз, разделение по категориям.

После определения базового коэффициента сети необходимо определить параметры, к которым он будет применяться.

Для определенной инфраструктуры можно раскрыть некоторые рассмотренные там угрозы, поскольку их расширение позволит более полно оценить защищенность инфраструктуры передачи данных, что и является целью данной методики. Несмотря на то, что составление списка угроз не является частью данной методики, для грамотной оценки проведения этой процедуры следует знать этот список.

Этап 5. Для каждой обособленной подсети передачи данных должны быть прописаны свои угрозы.

Угрозы данных должны быть разделены по степени воздействия на информацию (если разные воздействия возможны).

После этого коэффициент реализации угрозы рассчитывается по следующей формуле:

$$K_p = K_{6c} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i \cdot n, \quad (1)$$

где N – общее число источников угроз; k_i – возможность реализации угрозы конкретным типом нарушителя i , этот коэффициент равен 1, если рассматриваемый источник способен реализовать угрозу, и равен 0 в противном случае; n – весовой коэффициент; этот коэффициент равен 0,8 в случае, если рассматриваемый источник – внешний антропогенный нарушитель; коэффициент равен 1,2 – в случае, если угроза реализуется внутренним антропогенным нарушителем; для прочих типов нарушителя (техногенный, стихийный) весовой коэффициент равняется единице.

Этап 6. Определение защищенности сети.

После предыдущего этапа для каждой угрозы есть соответствующий ей коэффициент реализации K_p .

Для оценки защищенности каждой из подсетей передачи данных требуется оценить значения K_p каждой из угроз, существующих для данной подсети:

– для угроз 1 типа система может считаться защищенной от данной конкретной угрозы, если соответствующий K_p меньше или равен 0,6;

– для угроз 2 типа система может считаться защищенной от данной конкретной угрозы, если соответствующий K_p меньше или равен 0,4;

– для угроз 3 типа система может считаться защищенной от данной конкретной угрозы, если соответствующий K_p меньше или равен 0,25.

Как можно заметить, чем критичнее угроза для системы, тем меньше должен быть коэффициент реализации, что с точки зрения практики означает, что возможность злоумышленнику реализовать данную угрозу должна быть минимальной. Если все K_p сети передачи данных соответствуют требуемым значениям – она может считаться *защищенной*. Если в сети присутствует K_p угрозы 1 типа, больший порогового значения, она считается *условно защищенной*. Для некоторых сетей, не связанных непосредственно с ОС РВ, отвечающих за контроль полёта, это приемлемо. При всех других комбинациях K_p сеть передачи данных считается *недоверенной*.

В целом, инфраструктура передачи данных считается защищенной, если состоит из защищенных и условно защищенных сетей, причём количество условно защищенных сетей не превышает 20 % от общего числа сетей в инфраструктуре.

Литература

1. Смит Д.Д. Функциональная безопасность. Простое руководство по применению стандарта МЭК 61508 и связанных с ним стандартов / Дэвид Дж. Смит, Кеннет Дж. Л. Симпсон. – М. Издательский Дом «Технологии», 2004. – 208 с.
2. Глинская Е.В., Чичварин Н.В. Моделирование угроз информационной безопасности бортовых вычислительных средств самолета. / Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, сер. «Приборостроение». – 2016. – № 6. – С. 85–97.

УДК 621.317.328:621.372.8

ДАТЧИК НАПРЯЖЕННОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ С НЕСКОЛЬКИМИ ЩЕЛЯМИ

Гончаренко И.А., Ильюшонок А.В., Рябцев В.Н.

Университет гражданской защиты МЧС Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Развитие методов измерений высокочастотных электрических полей становится важнейшим направлением в области электромагнитных исследований [1, 2]. Оптические датчики электрического поля имеют значительные преимущества перед их электронными аналогами благодаря малым размерам, меньшему весу, более высокой чувствительности, широкому спектральному диапазону, защищенность канала передачи данных от воздействия помех [9]. В работах [3, 4] нами предложены структура и принцип работы

оптических датчиков электромагнитных полей на основе микрокольцевых резонаторов на базе оптических волноводов с горизонтальной и вертикальной щелью, заполненной жидким кристаллом (ЖК) или электрооптическим полимером (ЭОП). Датчик с заполнением ЖК обладает высокой чувствительностью, но позволяет измерять переменные электрические поля с частотами лишь до десятков кГц. Датчик с заполнением ЭОП позволяет измерять электрические поля с частотой более 1 МГц, но его чувствительность

на порядок хуже, чем у аналогичного устройства с использованием ЖК [4, 5]. Это объясняется тем, что изменения показателя ЭОП под воздействием электрического поля на несколько порядков меньше, чем у ЖК.

Для увеличения чувствительности датчика высокочастотных электрических полей на основе микрокольцевых резонаторов в работе предлагается использовать оптические волноводы с двумя горизонтальными или вертикальными щелями, заполненными ЭОП.

Структура микрокольцевого резонатора на основе волноводов с двумя вертикальными и горизонтальными щелями с заполнением ЭОП представлена на рисунок 1.

Микрорезонатор представляет собой замкнутый кольцевой волновод с горизонтальными или вертикальными щелями, выполненный из Si_3N_4 или кремния, расположенный на кремниевой подложке. Для того чтобы получить условие полного внутреннего отражения, между волноводом и подложкой располагается буферный слой SiO_2 с показателем преломления, меньшим показателя преломления волновода. Электрооптический полимер SEO125 заполняет вертикальные или горизонтальные щели кольцевого волновода. Для ввода и вывода оптического сигнала из кольцевого резонатора используются прямые оптические волноводы, связанные с кольцевым волноводом через спадающие поля и расположенные на той же подложке. Общая ширина щелевого волновода составляет 1000 нм, высота – 300 нм. Длина волны оптического излучения равна 1550 нм.

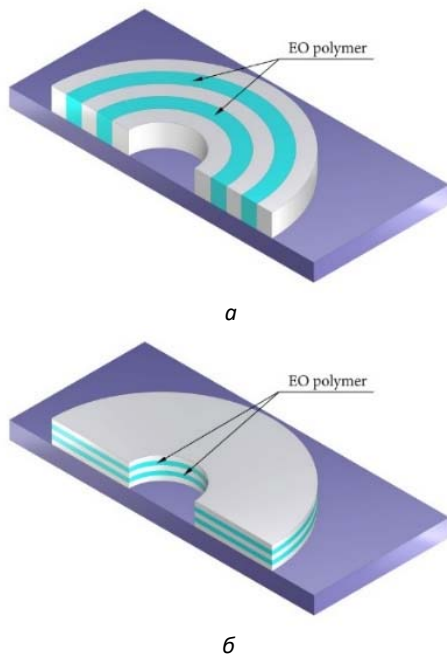


Рисунок 1 – Структуры микрокольцевого резонатора на основе волноводов с двумя вертикальными (а) и горизонтальными (б) щелями с заполнением ЭОП

Активный органический электрооптический полимер SEO125 обладает малыми оптическими потерями для излучения с длиной волны 1550 нм, большим электрооптическим коэффициентом и хорошей временной стабильностью и позволяет определять напряженность переменного электрического поля с частотой до 8,4 ГГц [6].

В качестве начальных параметров оптического излучения использовались параметры полупроводникового лазера FU-68PDF-V510M с выходной оптической мощностью 15 мВт на длине волны 1,5 мкм. Оптическое излучение на выходе из кольцевого резонатора преобразовывалось в электрический сигнал р-і-n фотодиодом ФД161 на основе соединения InGaAs. Токловая чувствительность такого фотодиода на рабочей длине волны 1,5 мкм не менее 0,8 А/Вт, темновой ток – не более 20 нА.

Чувствительность датчика характеризуется наклоном кривых, описывающих зависимость оптического сигнала на выходе резонатора от интенсивности воздействия внешнего электрического поля. Расчет эффективного показателя преломления и распределение полей мод изогнутых щелевых волноводов с заполнением ЭОП проводился с помощью метода линий [7], модифицированного для исследуемой структуры. При проведении расчетов не учитывались потери на входе/выходе оптического излучения в волновод и потери на излучение.

На рисунке 2 представлено сравнение сигналов на выходе резонатора на базе изогнутых волноводов с одной вертикальной щелью шириной 200 нм и двумя щелями шириной 100 нм каждая с заполнением ЭОП в зависимости от напряженности внешнего электрического поля. Суммарная ширина щелей в обоих случаях совпадает, что обеспечивает одинаковое количество ЭОП, заполняющего щели. Как видно из рисунка, сигнал на выходе резонатора на базе волновода с двумя щелями более резко реагирует на изменение напряженности внешнего электрического поля. Таким образом, чувствительность датчика на основе такого резонатора гораздо выше, чем у датчика на основе волновода с одной щелью при одинаковом заполнении ЭОП.

Как показал анализ, чувствительность датчика на основе волноводов с двумя щелями повышается при уменьшении ширины щелей. Это можно объяснить увеличением амплитуды поля направляемых мод таких волноводов в области щелей, заполненных ЭОП, при уменьшении ширины щелей. Таким образом, параметры направляемых мод волноводов более резко изменяются под воздействием внешнего электрического поля. Изменение напряженности электрического поля на 1 В/м вызывает изменения тока фотодиода в датчике на основе волновода с шириной щелей 2×100 нм и 2×25 нм примерно на 0,33

и 0,67 нА (чувствительность датчика соответственно равна 0,33 и 0,67 нА/(В/м)). Поскольку темновой ток фотоприемника порядка 20 нА, очевидно, что такие датчики не позволяют отслеживать изменения напряженности внешнего электрического поля менее чем на 61 и 30 В/м. Таким образом, датчик на основе волновода с двумя вертикальными щелями с радиусом изгиба волновода 32 мкм и разнесением щелей 100 нм может быть использован для измерений напряженности электрического поля с точностью до 40–70 В/м в диапазоне до $50 \cdot 10^6$ В/м.

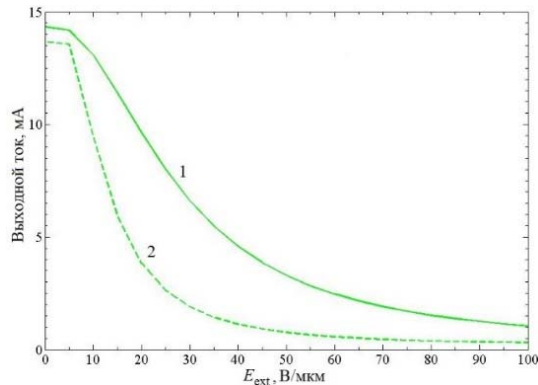


Рисунок 2 – Зависимость сигнала на выходе кольцевого резонатора на основе волновода с одной (1) и двумя (2) вертикальными щелями с заполнением ЭОП от напряженности электрического поля. Радиус изгиба волновода 32 мкм, ширина щели 200 нм (1) и 2×100 нм (2)

Чувствительность датчика можно увеличить за счет изменения расстояния между щелями. При этом существует оптимальное расстояние между щелями, при котором чувствительность датчика наибольшая. Это расстояние соответствует примерно 320 нм. При этом оптимальное разнесение щелей не зависит от ширины щелей.

Чувствительность датчика с разнесением щелей 300 нм и шириной щелей 2×100 нм составляет 0,67 нА/(В/м), что примерно в два раза выше, чем при разнесении щелей 100 нм.

Наличие оптимального расстояния между щелями можно объяснить с помощью анализа поперечного распределения полей мод щелевого волновода. При малом разнесении щелей интенсивности поля волноводной моды в области щели мала. При большом разнесении щелей распределение поля волноводной моды становится подобным распределению поля моды обычного волновода, роль которого играет центральная

часть волновода с двумя щелями. Таким образом, в области щелей с заполнением ЭОП интенсивность поля моды также незначительна. При оптимальном разнесении щелей интенсивность поля моды в области щелей велика. Это приводит к наибольшему изменению поля моды при изменении показателя преломления ЭОП под воздействием электрического поля, и обеспечивает наибольшую чувствительность датчика на основе такого волновода.

Предложенный датчик позволяет измерять переменные электрические поля с частотой до 10 МГц. Использование волновода с двумя щелями с заполнением ЭОП позволяет существенно увеличить чувствительность датчика. При использовании фотоприемника с темновым током 20 нА датчик позволяет измерять изменения напряженности электрического поля порядка 30 В/м. При этом диапазон измерений достигает $50 \cdot 10^6$ В/м.

Литература

1. Suo C. GIS very fast transients overvoltage testing using electric field measurements / C. Suo [et al.] // *Integr. Ferroelectrics*, 2017, vol. 178, no. 1. – P. 23–34.
2. Evan S.J. Electric field measurement of two commercial active/sham coils for transcranial magnetic stimulation / S.J. Evan, A.V. Peterchev // *J. Neural Eng.* – 2018, vol. 15, no.5. – P. 054001.
3. Goncharenko I. Electric field sensing with liquid-crystal-filled slot waveguide microring resonators / I. Goncharenko, M. Marciniak, V. Reabtsev // *Applied Optics*. – 2017, vol. 56, iss. 27. – P. 7629–7635.
4. Гончаренко И.А. Измерение параметров высокочастотных электрических полей с помощью щелевых волноводов с заполнением электрооптическим полимером / И.А. Гончаренко, В.Н. Рябцев // *Приборостроение-2019: мат. 12-й Междунар. науч.-техн. конф.*, 13–15 ноября 2019 года. – Минск: БНТУ, 2019. – С. 11–13.
5. Гончаренко И.А. Датчик напряженности высокочастотных электрических полей на основе оптических волноводных структур / И.А. Гончаренко, А.В. Ильюшонок, В.Н. Рябцев // *Квантовая электроника: мат. XII Междунар. науч.-техн. конф.*, г. Минск, 18–22 ноября 2019 г. – Минск: РИВШ, 2019. – С. 167–168.
6. Zhang X. Integrated photonic electromagnetic field sensor based on broadband bowtie antenna coupled silicon organic hybrid modulator / Xingyu Zhang [et al.] // *J. Lightwave Technology*, 2014, vol. 32, no. 20. – P. 3774–3784.
7. Pregla R. The method of lines for the analysis of dielectric waveguide bends / R. Pregla // *Journal of Lightwave Technology*. – 1996, vol. 14, no. 4. – P. 634–639.

УДК 539.1.074

АРХИТЕКТУРА РАДИОМЕТРОВ-ДОЗИМЕТРОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ 32-БИТНЫХ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ

Гуркинов М.С., Левко И.А.

Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Для оценки количественных характеристик ионизирующего излучения (ИИ) используются приборы, получившие название радиометры, дозиметры и спектрометры. Радиометры обеспечивают определение активности и плотности потока ИИ тогда, как дозиметры позволяют измерять дозу облучения, а спектрометры – радионуклидный состав источника ИИ по энергетическим спектрам [1]. Вместе с тем практическое применение получили универсальные приборы, сочетающие в себе функции радиометра и дозиметра.

В приборах дозиметрического контроля, которые служат для решения ряда измерительных задач в медицине и различных технических областях, используются детекторы ИИ, действие которых основано, в основном, на явлении ионизации либо преобразовании энергии частиц ионизирующего излучения в световые вспышки. В первом случае происходит прямое преобразование энергии частицы в электрический импульс, во втором – требуется дополнительное оборудование для получения электрических сигналов. По этой причине до недавнего времени в переносных дозиметрах применялись только газоразрядные детекторы [2]. Ситуация изменилась с появлением твердотельных фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), имеющих характеристики, сопоставимые с характеристиками ФЭУ электровакуумного типа [3], и существенно меньшие габариты.

Электронные приборы для регистрации ИИ имеют обобщенную функциональную схему, показанную на рисунке 1.

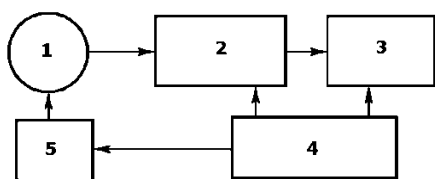


Рисунок 1 – Обобщенная функциональная схема прибора для измерения характеристик ИИ [1]:

- 1 – детектор; 2 – устройство усиления и преобразования электрических сигналов;
- 3 – регистрирующее устройство; 4 – источник питания; 5 – источник высокого напряжения

Основным преимуществом газоразрядных детекторов является то, что при их использовании устройство усиления и преобразования электрических сигналов 2 (рисунок 1) существенно упрощается.

Промышленностью выпускаются счетчики Гейгера-Мюллера с самогашением, имеющие малые габариты и рассчитанные на регистрацию частиц ИИ различного типа и энергий. Мертвое время T_M таких детекторов составляет порядка 10^{-4} с, а время полного восстановления T_B обычно превышает эту величину.

Статистическая природа актов излучения частиц источником, заранее неизвестная интенсивность источника и достаточно большое значение мертвого времени счетчиков Гейгера-Мюллера приводят к возникновению ряда проблем при работе измерительных приборов.

Для пуассоновского потока событий даже при малых загрузках детектора интервал между отдельными детектируемыми частицами может быть меньше мертвого времени T_M , что приводит к появлению просчетов. Учет этого явления обеспечивается следующим выражением [2]:

$$n_0 = \frac{n_{изм}}{1 - n_{изм}T_M}, \quad (1)$$

при условии

$$n_{изм}T_M \ll 1, \quad (2)$$

где n_0 – среднее число событий в единицу времени на входе детектора; $n_{изм}$ – среднее число зарегистрированных частиц.

При увеличении интенсивности потока событий на входе детектора до значений, при которых $n_{изм}T_M \sim 1$, выражение (1) становится недействительным и наблюдается занижение результатов измерительным прибором. Это может приводить к избыточному облучению людей и неправильной оценке экологической обстановки.

Лавинный разряд, возникающий при регистрации частицы ИИ, вызывает протекание тока через анодный резистор детектора и падение напряжения на нем, что снижает напряженность электрического поля в рабочей области детектора и предотвращает возникновение непрерывного разряда, который может вывести детектор из строя при больших нагрузках. Благодаря этому, при использовании счетчика Гейгера-Мюллера появляется возможность измерения тока потребления, на основании чего можно производить контроль превышения интенсивностью ИИ рабочего диапазона детектора и включать сигнализацию, свидетельствующую об опасности пребывания дозиметриста в данной местности.

Применение метода «время до первого импульса» (time to first count) позволяет почти на

два порядка увеличить диапазон измеряемых газоразрядным детектором интенсивностей ИИ (до 10^5 импульсов в секунду) [4], но приводит к необходимости периодического изменения напряжения питания и точного измерения временных интервалов.

Постоянное ужесточение требований радиационной безопасности обуславливает непрерывное совершенствование характеристик переносных радиометров и дозиметров, включая расширение диапазона измеряемых интенсивностей ИИ, повышение точности оценки дозы облучения, плотности потока ИИ и т. п. Лучших результатов можно достичь, применяя в одном приборе несколько детекторов, в том числе и различного типа, и соответственно несколько каналов усиления и преобразования электрических сигналов.

При этом входные измерительные каналы должны обеспечивать обработку не только дискретных, но и аналоговых сигналов, например, измерение максимального значения импульсов от детекторов ИИ, рабочих токов и напряжений.

Кроме входных измерительных каналов должны быть предусмотрены выходные каналы для управления режимами работы прибора.

В итоге современный прибор должен представлять измерительную систему, обобщенная функциональная схема которой приведена на рисунке 2.

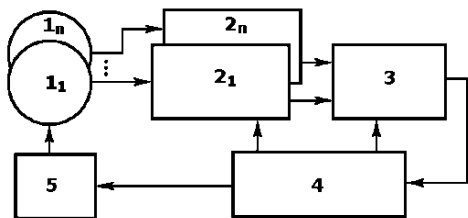


Рисунок 2 – Обобщенная функциональная схема системы для измерения характеристик ИИ:

$1_1 \div 1_n$ – детекторы; $2_1 \div 2_n$ – устройства усиления и преобразования электрических сигналов; 3 – интеллектуальное регистрирующее устройство; 4 – источник питания; 5 – управляемый источник высокого напряжения

В отличие от традиционного метода построения измерительных систем, основанных на принципе множественных измерительных каналов, для каждого из которых характерна структура, приведенная на рисунке 1, целесообразным является использование одного интеллектуального регистрирующего устройства (3) вместо набора таких устройств. Однако данный подход требует, чтобы регистрирующее устройство

обеспечивало обработку смешанных сигналов, благодаря сочетанию аналоговых и цифровых схем таких как, операционные усилители (ОУ), компараторы, аналого-цифровые (АЦП) и цифроаналоговые (ЦАП) преобразователи, таймеры и встроенное программное обеспечение.

До недавнего времени такие задачи можно было решать только с помощью специализированных сигнальных процессоров (DSP). Поступательное развитие КПОП-технологии и совершенствование архитектуры микропроцессоров ARM Cortex-M привело к снятию данного барьера. Микроконтроллеры с данной архитектурой выпускаются рядом ведущих компаний в области микроэлектроники.

В качестве обоснования данных положений можно привести линейку микроконтроллеров STM32G4 компании ST Microelectronics, построенных на базе ядра ARM Cortex-M4 [5].

Микроконтроллеры данного семейства содержат набор 16-битных и 32-битных таймеров общего назначения с временным разрешением от 11 до 6 нс, быстродействующие ОУ, компараторы, АЦП, ЦАП.

Высокая скорость вычислений обеспечивается не только за счет использования внутренней тактовой частоты 170 МГц, но и аппаратных математических сопроцессоров CORDIC (COordinate Rotation Digital Computer) и FMAC ((Filter Math Accelerator).

Данный подход позволяет создавать универсальные переносные дозиметрические приборы содержащие сцинтилляционный детектор, торцевой слюдяной газоразрядный детектор, несколько цилиндрических счетчиков Гейгера-Мюллера для расширения диапазона измеряемых интенсивностей и повышения точности и оперативности дозиметрического контроля.

Литература

1. Голубев Б.П. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
2. Григорьев В.А., Колубин А.А., Логинов В.А. Электронные методы ядерно-физического эксперимента. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 336 с.
3. Иванов И. Методика оценки и сравнения кремниевых фотоумножителей // Фотоника. – № 6. – 2015. – С. 70–79.
4. Knoll G.F. Radiation detection and measurement. – 4th ed. – New York, NY: Wiley, 2010. – 864 p.
5. Гавриков В. STM32G4 – новый флагман микроконтроллеров общего назначения. [Электронный ресурс] / Компания КОМПЭЛ. – КОМПЭЛ, 2020. – Режим доступа: <https://www.compel.ru/lib/138282>. – Дата доступа : 10.06.2020.

УДК 620.179.111

ВАКУУМНАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ КАПИЛЛЯРНОГО КОНТРОЛЯ

Деленковский Н.В., Гнусин А.Б.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

Из технической литературы известен процесс вакуумной интенсификации заполнения поверхностных дефектов пенетрантами в капиллярной дефектоскопии [1–3], при котором, как отмечается, значительно повышаются чувствительность и производительность контроля. Также предлагаются возможные схемы реализации такого процесса, основанные на использовании специальных вакуумных камер, введении в них значительных объемов пенетранта, полного погружения в него контролируемых изделий, вакуумирования и последующей пропитки [1, 4, 5].

Существенным недостатком таких способов пропитки является необходимость использования сложных и дорогостоящих вакуумных установок. Реализация каждой из вышеуказанных схем пропитки не экономична из-за неизбежных процессов кипения и испарения легких фракций пенетранта при пониженном давлении, что приводит к существенному ухудшению его рабочих свойств. Пары испарившейся летучей фазы пенетранта попадают в масло вакуумного насоса, которое также быстро теряет свои свойства. Указанные факторы приводят к низкой экономической эффективности вакуумной пропитки с использованием стационарных вакуумных камер, вследствие чего данный способ интенсификации не получил широкого распространения на практике.

В данной работе проведены исследования нового экономичного способа вакуумной пропитки изделий пенетрантами при капиллярном контроле при предельно малых объемах пенетрантов на контролируемых поверхностях.

Методика проведения исследований. Для выполнения работы была разработана и изготовлена экспериментальная вакуумная установка, схема и фотография которой представлены на рисунке 1.

Установка состоит из цилиндрического корпуса 1, в котором на кронштейне 2 закрепляется исследуемый образец 3 с искусственными дефектами. Корпус закрывается крышкой 4 с окном 5 из кварцевого стекла, которое обеспечивает эффективное пропускание ультрафиолетового излучения при проведении люминесцентного капиллярного контроля. Вакуумный насос 6 обеспечивает степень разряжения до 10–20 Па. Измерение разряжения производится вакуумметром 7. Введение пенетранта в камеру осуществляется с использованием вакуумного ввода 8.

При проведении экспериментальных исследований использовались автоматизированная

система обработки и анализа видеоизображений [6] и экспериментальные образцы из нержавеющей стали AISI 430 с различными геометрическими характеристиками дефектов, описанные в работе [7], а также контрольные образцы, соответствующие ГОСТ Р ИСО 3452-3–2009 [8]. С целью выявления характера пропитки дефектов и обеспечения возможности визуального контроля данного процесса, разработаны и изготовлены специальные образцы из стекла со щелевидными дефектами глубиной 3–40 мм, шириной раскрытия 20–40 мкм и длиной 10–40 мм.

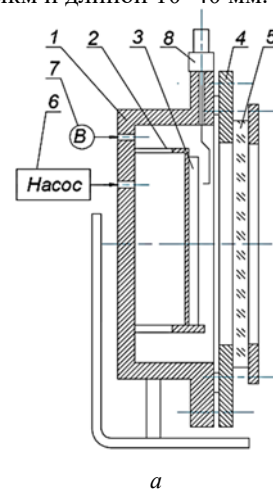


Рисунок 1 – Схема (а) и фотография (б) экспериментальной установки для вакуумной интенсификации процесса заполнения дефектов пенетрантами

Капиллярный контроль образцов осуществлялся в соответствии с СТБ 1172-99 [9]. В экспериментах использовались водосмываемые люминесцентный пенетрант Вycotest FP42 и цветной Sonapen VP-650, а также суспензионный проявитель MR-Chemie MR-70, наносимый на контролируемую поверхность аэрозольным распылением.

Как известно, температура кипения жидкостей с уменьшением давления уменьшается, а скорость испарения тонких слоев жидкости увеличивается. С целью исследования влияния этого процесса на качество капиллярного контроля проведена серия экспериментов. Скорость испарения (летучесть) жидкой фазы тонких слоев пенетрантов в вакууме и при атмосферном давлении исследовалась по увеличению во времени площади растекания единичных капель объемом $\sim 10 \text{ мм}^3$ на поверхностях контрольных образцов из стали AISI 430.

Результаты исследований. Полученные данные по кинетике растекания единичных капель исследуемых пенетрантов показали отсутствие существенного ухудшения растекаемости капель. Средняя толщина слоев пенетрантов при нанесении и растекании капель через 3–6 с составляла $\sim 0,1 \text{ мм}$. Кипение в вакууме (10–20 Па) жидкой фазы пенетрантов в таких слоях не выявлено.

Перед исследованием процесса вакуумирования контролируемые поверхности образцов полностью покрывались слоем пенетранта. Далее образцы помещались в вакуумную камеру и производилась откачка воздуха до 10–20 Па. При этом через 3–6 с наблюдалось формирование газовых пузырей над полостью дефекта, что связано со значительным поверхностным натяжением пенетранта. При разгерметизации камеры и воздействии атмосферного давления начинался быстрый процесс пропитки полости дефекта, который через 15–20 с приводил к заполнению полости дефекта на 80–85%. Повторное проведение цикла вакуумирования и пропитки незначительно увеличило степень заполнения полости дефектов (до $\sim 90\%$).



Рисунок 2 – Сравнительные диаграммы по пропитке дефектов пенетрантами при использовании вакуумной интенсификации

На рисунке 2 представлены характерные сравнительные диаграммы, из которых можно сделать вывод о том, что после вакуумной пропитки образцов при проведении капиллярного контроля площадь следов дефектов увеличивается на 30–100 % (по сравнению с традиционной технологией контроля).

Также установлено, что для контрольных образцов с дефектами глубиной 30–50 мкм и раскрытием 1,5–3 мкм [8] аналогичное увеличение площади следов дефектов составляет 20–40 %.

Выводы. Проведены экспериментальные исследования вакуумной интенсификации процессов заполнения дефектов в образцах из нержавеющей стали AISI 430 и стекла проникающими жидкостями при проведении капиллярного контроля. Использование вакуумной пропитки существенно повышает чувствительность капиллярного контроля (в 1,3–2 раза), особенно при выявлении дефектов с малыми раскрытиями 1–3 мкм.

Полученные результаты могут стать основой для разработки экономичной бескамерной вакуумной пропитки изделий пенетрантами при капиллярном контроле.

Литература

1. Неразрушающий контроль: Справочник в 8 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 4: В 3 кн. Кн. 3: М.В. Филинов. Капиллярный контроль. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2006. – 736 с.
2. Богданов Е.А. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования. М.: Высшая школа, 2006. – 279 с.
3. Калинин Н.П., Калинин А.Н. Капиллярный контроль: учебное пособие для подготовки специалистов I, II и III уровня. Томск, ТПУ, 2010. – 292 с.
4. Michael Schröder, Christoph Biedermann, Reinhard Vilbrandt. On the applicability of dye penetrant tests on vacuum components: Allowed or forbidden? // Fusion Engineering and Design. October 2013. – Vol. 88 (9–10). P. 1947–1950.
5. Патент 6342400 В1 США. Dye penetrant test for semiconductor package assembly sol-der joints / Kevin M. DePetrillo. Оpubл. 29.01.2002.
6. Мигун Н.П., Гнусин А.Б., Волович И.В. Компьютеризированная система определяет качество дефектоскопических материалов // Промышленная безопасность. 2004. – №1. – С. 34–36.
7. Деленковский Н.В., Гнусин А.Б. Оценка глубины поверхностных дефектов при капиллярном контроле // Дефектоскопия. – 2017. – № 3. – С. 74–78.
8. ГОСТ Р ИСО 3452-3–2009. Контроль неразрушающий. Проникающий контроль. Часть 3. Испытательные образцы.
9. СТБ 1172-99. Контроль неразрушающий. Контроль проникающими веществами (капиллярный).

УДК 621.382

МЕТОД МОДУЛЯЦИОННОГО ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В ДИАГНОСТИКЕ КАЧЕСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

Сопряков В.И., Кастевич А.Е.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Контроль статической вольт-амперной характеристики (ВАХ) полупроводниковых нелинейных элементов и её параметров является распространённой формой операционного контроля и контроля готовой продукции, так как он является неразрушающим и может быть реализован простыми методами и средствами. На ВАХ полупроводниковых приборов оказывают влияние химические примеси и электрически активные дефекты, неоднородности распределения электрофизических параметров материала, микро и макродефекты структуры, состояние поверхности и качество контактов. Эти факторы определяют надёжность прибора, однако их влияние на ВАХ может быть незначительным и не может быть обнаружено по её виду.

Измерение и запись кривой второй производной ВАХ $I''(U)$ позволяет решить задачу разрешения её тонкой структуры и определения факторов, влияющих на надёжность. В зависимости от типа прибора и ветви ВАХ, в которой проводится контроль, получаемая информация может носить как качественный, так и количественный характер.

Известно, что амплитуда второй гармоники (U_2) переменного тока низкой частоты в режиме малого сигнала в цепи нелинейного элемента пропорциональна $I''(U)$. Для измерения $I''(U)$ разработана установка модуляционного дифференцирования ВАХ, в которой реализован метод детектирования гармоник. Установка позволяет измерять и записывать

на двухкоординатный потенциометр ВАХ и её вторую производную в диапазонах 0–2,0 В и 0–1000 В. Чувствительность в режиме измерения второй гармоники составляет от 0,3 до 1 мкВ при отношении сигнал-шум, равном трём.

В сильно легированных р-п-переходах с концентрацией мелких примесей 10^{19} – 10^{21} см⁻³ преобладает туннельный механизм проводимости, что позволяет реализовать туннельную инжекцию носителей заряда на глубокий уровень. Следствием такого процесса является образование в прямой ветви ВАХ малых максимумов избыточного тока, которые суммируются с гладкой компонентой ВАХ, имеющей экспоненциальный характер (рисунок 1).

Принимая максимум избыточного тока в форме нормального распределения, получена формула для обработки экспериментальных зависимостей напряжения второй гармоники от напряжения смещения на образце

$$I_{tm} = 0,115(4U_{2tm}/U_{\Pi}^2 R_{\Pi}) \Delta U^2, \quad (1)$$

где I_{tm} – значение избыточного тока в максимуме, U_{2tm} – разность между значениями фоновой и сигнальной кривых напряжения второй гармоники (рисунок 1); U_{Π} – амплитуда напряжения переменного тока в цепи образца; R_{Π} – значение малого измерительного сопротивления, включенного последовательно с образцом; ΔU – полуширина особенности кривой $I''(U)$. Предельное разрешение максимума избыточного тока составляет 0,003–0,01 от значения фонового тока.

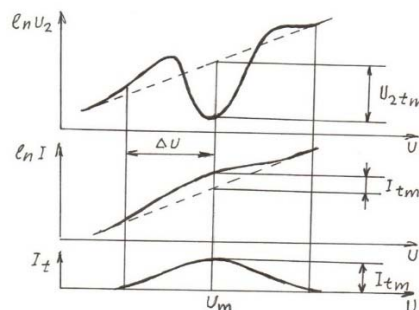


Рисунок 1 – Сложение максимума и фоновой избыточного тока (штриховая кривая)

В работе рассчитан избыточный туннельный ток, представляющий двухступенчатый процесс с участием глубокого уровня дефекта, включающий туннелирование и рекомбинацию. При условии полного перекрытия энергетических состояний электронов и глубокого центра приближённое аналитическое решение даёт

$$I_{tm} = AT_n \sigma_n^t E_{tm} \xi_t L, \quad (2)$$

где $A = 4\pi m_n^*/(2\pi\hbar)^3$, T_n – прозрачность барьера; N_t – концентрация глубокого центра; σ_n^t – сечение захвата туннелирующего электрона; E_{tm} – средняя энергия туннелирующих электронов, отсчитанная от дна зоны проводимости; ξ_t – ширина распределения плотности энергетических состояний центра; L – ширина области поглощения туннелирующих носителей.

Разработан метод оценки положения и ширины энергетического распределения глубокого уровня дефекта, а также его концентрации согласно формулам (1) и (2). Энергетическое положение глубокого уровня однозначно связано с напряжением минимума на кривой $I''(U)$. Примеры разрешения структуры ВАХ с помощью двойного дифференцирования приведены на рисунках 2 и 3. Концентрационная чувствитель-

ность метода $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$, что по отношению к мелким примесям составляет $10^{-4} - 10^{-6}$.

На основе разработанного метода определён энергетический спектр и параметры остаточных и радиационных дефектов в сильно легированном p-GaAs ($E_c - 0,22$; $E_c - 0,41$; $E_c - 0,73$; $E_v + 0,32$; $E_v + 0,10$ эВ).

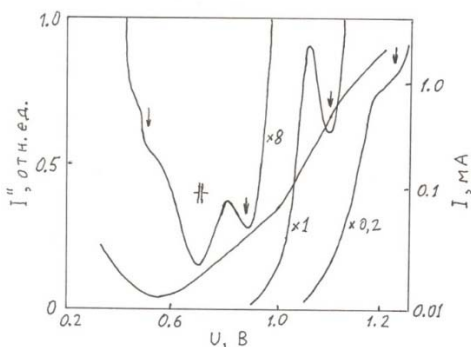


Рисунок 2 – ВАХ и её вторая производная диода на основе сильно легированного GaAs при $T = 77 \text{ K}$ (стрелками указаны положения максимумов избыточного тока)

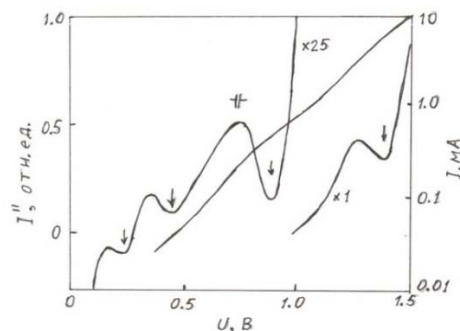


Рисунок 3 – ВАХ и её вторая производная диода на основе сильно легированного GaAs, облученного быстрыми электронами с энергией 30 МэВ интегральным потоком $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ($T = 77 \text{ K}$)

Концентрация технологических дефектов в зависимости от концентрации мелкой примеси изменяется в интервале $10^{15} - 10^{17} \text{ см}^{-2}$, а величина сечения захвата электронов в интервале $10^{-15} - 10^{-17} \text{ см}^2$. Экспериментальные кривые второй производной ВАХ могут быть хорошо объяснены с помощью предложенной модели.

УДК 621.382

ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ФОТО-ЭДС

Микитевич В.А., Жарин А.Л.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

На этапе производства полупроводниковой микроэлектроники возникает необходимость измерения параметров полупроводниковых пластин. Существующие контактные методы измерения оказывают разрушающее воздействие на исследуемую поверхность, что приводит к уменьшению выхода годных изделий. Поэтому в последнее время все шире применяются бесконтактные зарядочувствительные методы измерения. Методы измерения контактной разности потенциалов (КРП) позволяют косвенно судить о наличии различных дефектов, неоднородности поверхности и т.п. Однако КРП сильно зависит от множества различных факторов, что затрудняет определение корреляции с конкретными физическими величинами. Другой характеристикой поверхности полупроводниковой пластины является поверхностная фото-ЭДС. Существует несколько способов измерения поверхности фото-ЭДС бесконтактным методом:

- 1) с непрерывной сканирующей засветкой образца;
- 2) метод измерения вибрирующим зондом Кельвина;
- 3) импульсный метод;

Метод измерения с непрерывной сканирующей засветкой образца основан на измерении разности работ выхода электрона. Измерение

производится за 2 этапа. На первом этапе измеряется работа выхода электрона при отсутствии освещения, на втором этапе – при непрерывном освещении лучом света. На основе полученных измерений рассчитывается поверхностная фото-ЭДС. Данный метод позволяет определять усредненное значение поверхностной фото-ЭДС по поверхности. При этом размеры области сканирования обычно составляют десятки нанометров [1].

Метод измерения вибрирующим зондом Кельвина аналогичен предыдущему методу. Отличие состоит в том, что используется вибрирующий зонд. Измерение проводится также в два этапа. Измерение также выполняется в два этапа. На первом этапе измерение производится в темноте. На втором этапе измерение производится при равномерном освещении всего образца. На основе разности полученных результатов измерений можно судить лишь о наличии фотоотклика. Такой метод измерения применяется для диэлектриков [2].

Основной недостаток вышеизложенных методов измерения – это необходимость проведения измерений за два этапа, что увеличивает время и погрешность измерений.

Импульсный метод измерения основан на измерении поверхностной фото-ЭДС при воздействии на исследуемый образец импульсным све-

товым излучением. При этом сигнал фото-ЭДС имеет экспоненциальную форму, что затрудняет измерение времени спада в области малых уровней сигнала. Пример воздействующего и ответного сигналов представлены на рисунке 1. Основным недостатком этого метода – сложность формирования идеального прямоугольного импульса светового излучения [3]. При формировании прямоугольного импульса при помощи пикосекундного лазера большое влияние на результат измерения оказывает измерительная схема из-за наличия паразитных составляющих элементов [4].

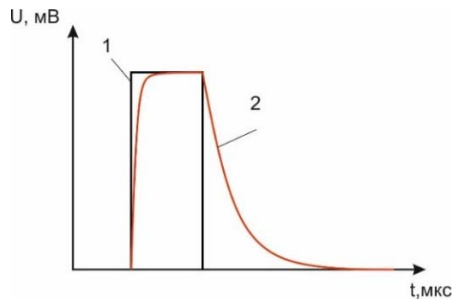


Рисунок 1 – Реакция на воздействие прямоугольным световым сигналом:
1 – кривая воздействующего светового излучения;
2 – кривая фото-ЭДС

Предложен метод измерения поверхностной фото-ЭДС путем воздействия модулированным световым излучением на исследуемую поверхность. Модуляция светового излучения позволяет изменять его интенсивность в широком диапазоне.

Основные преимущества модулированного сигнала:

- 1) возможность получать воздействующий световой сигнал различной формы, например синусоидальной;
- 2) возможность получать измерительный сигнал различной формы;
- 3) возможность проводить измерения в установившемся режиме, а не во время переходных процессов;
- 4) отсутствие высших гармоник в измерительном сигнале;
- 5) уменьшаются частотные требования к усилителям сигнала;
- 6) упрощается фильтрация измерительного сигнала.

На рисунке 2 упрощенно представлен принцип формирования светового излучения по средством широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Управляющие импульсы представлены на графике а. На графике б представлена аппроксимированная кривая светового излучения в тех же временных координатах. Аппроксимация выполняется либо между источником сигнала и источником светового излучения (активный или пассивный фильтр), либо на поверхности исследуе-

мого образца. Во втором случае частота ШИМ должна значительно превышать частотные свойства исследуемого образца.

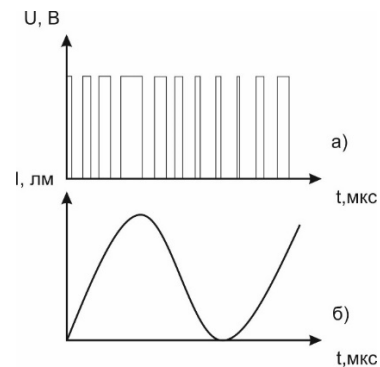


Рисунок 2 – Формирование светового сигнала синусоидальной формы:
а – формирование импульсов управления источником светового излучения; б – кривая светового излучения

При воздействии на исследуемую поверхность синусоидальным световым излучением фото-ЭДС также будет изменяться по синусоидальному закону. В первый момент времени вид воздействующего сигнала и кривой фото-ЭДС представлены на рисунке 3.

После прохождения нескольких периодов воздействующего светового сигнала завершаются переходные процессы и работа продолжается в установившемся режиме. При этом информативной становится основная гармоника измерительного сигнала. Появление высших гармоник связано с возникновением наводок и шумов. Выделение основной гармоник может осуществляться при помощи фильтра. В качестве фильтров используются активные аналоговые или цифровые фильтры.

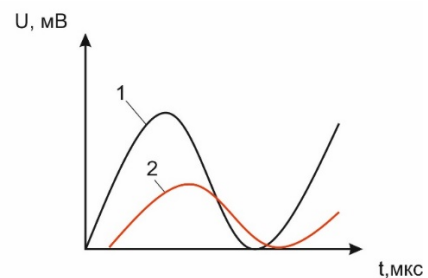


Рисунок 3 – Реакция на воздействие синусоидальным световым сигналом:
1 – кривая воздействующего светового излучения;
2 – кривая фото-ЭДС

Усиление синусоидального сигнала на одной частоте позволяет в значительной степени упростить построение входного усилителя. В отличие от широкополосных усилителей, узкополосные усилители обладают рядом преимуществ:

- 1) малые нелинейные искажения;
- 2) не требуется частотная коррекция;
- 3) нет жестких требований для скорости нарастания сигнала усилителя.

Из вышесказанного следует, что при построении входного усилителя можно использовать низкочастотные усилители. Как правило, низкочастотные усилители обладают большим коэффициентом усиления и малыми входными токами.

Таким образом предложенный метод измерения поверхностной фото-ЭДС обладает рядом преимуществ, которые позволяют в значительной степени упростить конструкцию измерительной системы, а также улучшить точность и достоверность результатов измерения.

Литература

1. Kevin O. A self-tracking method for local surface-photovoltage measurements on semiconducting surfaces /

O. Kevin, S. Speller, I. Barke // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. – 2017. 50 204004

2. Анализ распределения электрофизических и фотоэлектрических свойств наноконпозитных полимеров модернизированным зондом Кельвина / К.В. Пантелеев, А.В. Кравцевич, И.А. Ровба, В.И. Лысенко, Р.И. Воробей, О.К. Гусев, А.Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 4. – С. 386–397.

3. Podshivalov, V.N. Determination of the diffusion length of charge minority carriers using digital oscillography of surface photovoltage / V.N. Podshivalov // Russ Microelectron. – 2010, vol. 39 p. 34–41.

4. Dittrich Th. Extraction of source functions of surface photovoltage transients at very short times / Th. Dittrich, O. Garcia Vera, S. Fengler, S. Pineda, S. Bönisch // Review of Scientific Instruments. – 2019. – Vol. 90

УДК 535-3: 535.314

ФОРМИРОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ И ГАММА-ПУЧКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИКАПИЛЛЯРНЫХ СТРУКТУР

Дудчик Ю.И.

*Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Пучки рентгеновского и гамма-излучения широко используются в науке, технике и медицине. Для их формирования используются различные элементы рентгеновской оптики, такие как зонные пластинки, многоэлементные преломляющие рентгеновские линзы, поликапиллярные линзы Кумахова, конические и параболические монокапилляры, многослойные зеркала, зеркала скользящего падения. Каждый из указанных элементов имеет свой собственный энергетический диапазон использования, однако для фотонов с энергией больше 100 кэВ эффективность указанных элементов падает. Что касается гамма-лучей с энергией фотонов от 100 кэВ до 1 МэВ, то недавно в [1] было показано, что показатель преломления для гамма-лучей с энергией около 1 МэВ больше единицы, что не соответствовало сложившимся представлениям. Предполагалось, что это открытие станет основой для создания нового вида гамма-оптики. Однако позже указанные авторы признали возможные ошибки в своей работе и сошлись во мнении, что показатель преломления для гамма-излучения меньше единицы, что является общепринятым. Следовательно, коллиматор, по-видимому, является единственным средством контроля гамма-излучения. Поскольку коллиматор характеризуется низкой светосилой, то разработка принципов и устройств для управления пучками гамма-излучения высоких энергий представляется многообещающей и актуальной.

В данной работе предлагается использовать многослойные структуры и поликапиллярные стеклянные структуры в качестве источников вторичного гамма-излучения для увеличения интенсивности гамма-излучения на объекте.

Идея состоит в том, что пропускать первичный пучок гамма-излучения от рентгеновской трубки или ускорителя электронов, через слоистую структуру: пучок будет испытывать рассеяние на электронной подсистеме структуры за счет эффекта Комптона, при этом часть пучка вторичного излучения в направлении каналов структуры образует дополнительный гамма-луч, который увеличит интенсивность излучения в заданном направлении.

На рисунке 1 показана структура, состоящая из плоских слоев материала с атомным номером Z (обозначен как 4), расположенных на расстоянии b друг от друга. Толщина отдельного слоя 4 равна a . Гамма-лучи из рентгеновской трубки или ускорителя пересекают слои структуры под углом φ и рассеиваются на электронной подсистеме атомов слоя 4. Лучи, рассеянные под углом θ , попадают в каналы структуры и образуют направленный пучок гамма-лучей, где θ – угол между рассеянным фотоном и первичным пучком.

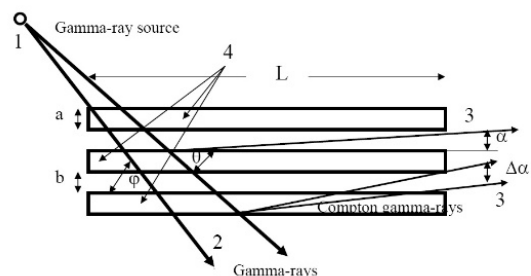


Рисунок 1 – Слоистая структура для генерации гамма-излучения

Интенсивность вторичного комптоновского гамма-пучка зависит от пропускания структуры в направлении угла α , где α – угол между рассеян-

ным пучком и поверхностью слоя. Если источник комптоновских лучей расположен на расстоянии x от поверхности слоя, то пропускание структуры T в направлении угла α (рисунок 1) можно определить как:

$$T = \exp\left(-\frac{kx}{\sin\alpha}\right), \quad (1)$$

где k – коэффициент ослабления излучения в материале слоя. Расходимость $\Delta\alpha$ вторичного гамма-пучка можно определить как $\Delta\alpha = b/L$, где L – длина структуры. Эффективная толщина слоя материала a может быть определена из соотношения:

$$a = \frac{1}{k} \Delta\alpha = \frac{b}{Lk}. \quad (2)$$

Например, рассмотрим слоистую структуру из стекла. Пробег $l_{abs} = 1/k$ фотонов с энергией 1 МэВ в стекле составляет 7,08 см. Для $L = 30$ см и $b = 10$ мкм значение a равно 2,3 мкм.

Для генерации вторичных комптоновских рентгеновских пучков использовались стеклянные поликапиллярные структуры в виде линзы Кумахова. Фотография линзы показана на рисунке 2.



Рисунок 2 – Фотография линзы Кумахова, которая использовалась в экспериментах

Линза Кумахова состоит из большого количества изогнутых поликапилляров. Рентгеновские лучи распространяются внутри стеклянных капилляров, как в волноводах, в режиме полного внешнего отражения от стенок капилляров. При традиционном использовании линзы она располагается на фокусном расстоянии f_1 от источника рентгеновского излучения, в то время как фокусное пятно линзы также находится на фокусном расстоянии f_2 : для использованной линзы $f_2 = 152$ мм для фотонов с энергией 8 кэВ. Нами предложен другой способ формирования рентгеновского пучка, в котором линза расположена близко к протяженному источнику рентгеновских лучей или гамма-излучения, как показано на рисунке 3 [2]. В этом случае на выходе из линзы наблюдаются два пучка излучения: первый, как результат прохождения излучения через поликапиллярную структуру в волноводном режиме, этот пучок показан как 4 на рисунке 3, а второй пучок – из-за комптоновского рассеяния на стенках капилляров, обозначен цифрой 5.

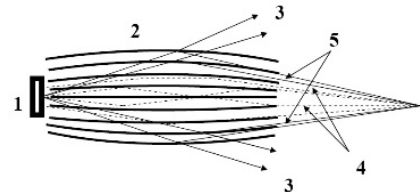


Рисунок 3 – Устройство для получения рентгеновского пучка:

1 – источник рентгеновских лучей; 2 – линза Кумахова; 3 – первичный пучок рентгеновских лучей; 4 – пучок рентгеновских лучей, прошедший через капилляры; 5 – рассеянные (комптоновские) пучки рентгеновских лучей

В качестве источника излучения использовалась рентгеновская трубка с медным анодом и фокусным пятном около 0,8 мм, напряжение на аноде составляло 38 кВ, ток 2 мА. На рисунке 4 показано изображение фокусного пятна рентгеновской трубки, полученное с помощью камеры-обскуры. Изображение было записано с помощью рентгеновской камеры Photonic Science. Изображение фокусного пятна рентгеновской трубки также было получено с помощью линзы Кумахова. Для этого линза располагалась близко к фокусному пятну рентгеновской трубки, а рентгеновская камера располагалась рядом с линзой на другой ее стороне.

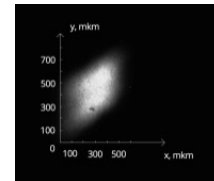


Рисунок 4 – Изображение фокусного пятна рентгеновской трубки, полученное с помощью камеры-обскуры

На рисунке 5 показано изображение рентгеновского пучка на выходе из кумаховской линзы при двух экспозициях: 3 с и 40 с. При экспозиции 3 с изображение сечения рентгеновского пучка совпадает с изображением фокусного пятна рентгеновской трубки, полученного с помощью камеры-обскуры. Это изображение формируется рентгеновскими лучами, которые распространяются через капилляры линзы в режиме полного внешнего отражения. При выдержке 40 с на рисунке 5, помимо лучей 4 в центре линзы, рентгеновские лучи наблюдаются по всему периметру линзы.

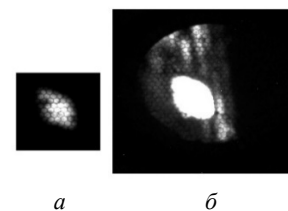


Рисунок 5 – Изображения рентгеновского пучка на выходе из линзы Кумахова при двух выдержках: 3 с (а) и 40 с (б)

Путем измерения размеров сечения рентгеновского пучка на различных расстояниях от линзы нами установлено, что два указанных пучка (проходящий и рассеянный) фокусируются линзой в одно пятно, что приводит к увеличению интенсивности рабочего пучка. Этот результат может быть использован при создании мощных источников гамма излучения.

УДК 535-3, 535.314

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБРАТНОРАСSEЯННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОСВЕЧИВАНИЯ ОБЪЕКТОВ

Дудчик Ю.И., Хилько Г.И., Кучинский П.В., Новик А.Н., Субач А.А.

*Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Рентгеновские лучи широко используются для просвечивания изделий и материалов с целью определения внутренних неоднородностей. Традиционно объект располагают между источником излучения и фотопленкой или 2D- детектором. В этом случае получается теневое изображение объекта в прямом пучке. Существует и другой способ получения изображения объектов в обратнорассеянных рентгеновских лучах, когда для получения изображения объекта, он сканируется узконаправленным рентгеновским пучком, а рассеянное излучение регистрируется детектором, который располагается со стороны источника излучения [1]. Процесс построения изображения заключается в том, что, перемещая по заданной траектории рентгеновский луч, можно произвести поточечное считывание двумерного изображения, рассчитанного на наблюдение в отраженном излучении. Рассеянное излучение, приобретающее при этом амплитудную модуляцию вследствие взаимодействия с объектом, преобразуется в электрический сигнал. При считывании изображения сканер дискретизирует его в виде совокупности отдельных точек (пикселей) разного уровня оптической плотности. Информация об уровнях оптической плотности этих точек анализируется, преобразуется в цифровую форму и вводится для дальнейшей обработки в компьютер. Преимущества такой методики получения информации об объекте связаны с односторонним доступом к объекту, поэтому разработка рентгеновского сканера, работающего на основе обратнорассеянного излучения, является актуальной проблемой.

Нами модернизирован ранее разработанный рентгеновский сканер на основе обратнорассеянного рентгеновского излучения [2]. Сканер, фотография которого приведена на рисунке 1, содержит рентгеновскую трубку, механическое сканирующее устройство для формирования рентгеновского пучка и детектор для измерения интенсивности обратнорассеянных рентгенов-

Литература

1. Refractive Index of Silicon at γ Ray Energies / Habs, D., Günther, M.M., Jentschel, M., Urban, W. // Phys. Rev. Lett., 108, 184802 (2012).
2. Compton effect based on a secondary source of hard x-ray beams / Yu. I. Dudchik, R. Rademacher, J.T. Cremer, R.H. Pantell, C.K. Gary, and M.A. Piestrup // Proc. SPIE 11108, Advances in X-Ray/EUV Optics and Components XIV, 111080Q (9 September 2019).

ских лучей. В устройстве сканирования использованы шаговые двигатели типа ДШИ 200. Применение шаговых двигателей позволило осуществлять позиционирование узконаправленного рентгеновского пучка на исследуемый объект и осуществлять сканирование без применения датчиков обратной связи. Точность позиционирования рентгеновского пучка на исследуемом объекте при его удалении от источника излучения на расстояние 500 мм составляет 0,5–3 мм.

Работа сканера обратнорассеянного рентгеновского излучения осуществляется следующим образом. После включения источника рентгеновского излучения (стационарная рентгеновская установка типа ДРОН-2) осуществляется сканирование исследуемого объекта рентгеновским пучком. Система позиционирования приводится в действие шаговыми двигателями под управлением модулей управления шаговыми двигателями и по командам, поступающим от микроконтроллера, что обеспечивает перемещение коллиматора по заданной траектории и соответственно направление потока рентгеновского излучения от источника рентгеновского излучения на исследуемый объект в заданное место и в строго определенное время.

Функциональная схема сканера обратнорассеянного рентгеновского излучения показана на рисунке 2. Регистрация обратнорассеянного рентгеновского излучения осуществляется сцинтилляционным детектором на основе монокристалла NaI(Tl) и фотоэлектронного умножителя, входящими в состав счетно-вычислительного устройства ЭВУ-1-4. Персональный компьютер (ПК) посредством микроконтроллера (МК) обеспечивает управление и синхронизацию работы сканирующего устройства, осуществляет подсчет импульсов, поступающих от детектора обратнорассеянного рентгеновского излучения, накопление, хранение и обработку информации. Полученное изображение выводится на экран монитора компьютера (ПК).

Проведены исследования параметров рентгеновского сканера на основе обратнорассеянного рентгеновского излучения. Получены изображения исследуемых объектов, располагаемых за преградой, путем их сканирования рентгеновским пучком и регистрации обратнорассеянного излучения. В качестве преграды использовалась пластина из алюминия. При сканировании пучок рентгеновского излучения проходит сквозь преграду и попадает на исследуемый объект. Обратнорассеянное излучение проходит через преграду и регистрируется детектором рентгеновского излучения.

В качестве источника рентгеновского излучения использовалась рентгеновская трубка БСВ - 18 с медным анодом. Напряжение на трубке составляло 20 кВ, ток 4 мА. Диаметр отверстия в диафрагме составлял 0,5–1 мм. Расстояние от сканера рентгеновского излучения до исследуемого объекта – 180 мм. Расстояние от преграды до исследуемого объекта составляло 50 мм. Для регистрации обратнорассеянного рентгеновского излучения использовалось указанное выше счетно-вычислительное устройство. Изображение объекта формировалось по заданному алгоритму и выводилось на экран монитора компьютера. Управление сканером, подсчет отраженных импульсов производится посредством микроконтроллера AtMega2560. Передача данных и команд управления осуществляется по USB-2 интерфейсу. Программное обеспечение разработано на базе Си/C++.

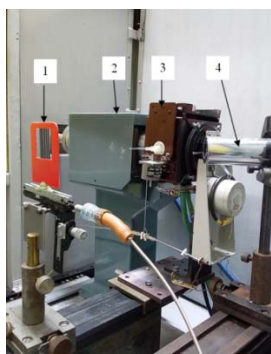


Рисунок 1 – Фотография рентгеновского сканера:
1 – объект исследования, 2 – источник рентгеновского излучения, 3 – система позиционирования, 4 – детектор обратнорассеянного рентгеновского излучения

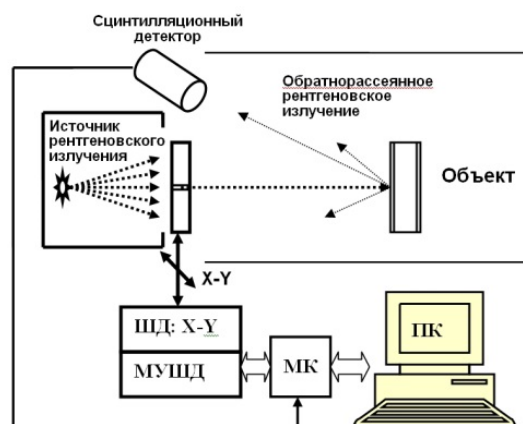
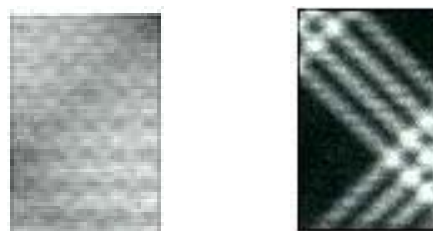


Рисунок 2 – Функциональная схема сканера

На рисунке 3 приведены полученные изображения исследуемых объектов, располагаемых за преградой в виде пластины из алюминия.



а б

Рисунок 3 – Изображения объектов, расположенных за алюминиевой преградой в обратнорассеянном рентгеновском излучении:
а – изображение железной пластины с отверстиями;
б – изображение железных стержней

Из рисунка 3 видно, что разработанный сканер позволяет получать изображения объектов в рентгеновских лучах, расположенных за преградой.

Литература

1. Забродский В.А. Применение обратнорассеянного рентгеновского излучения в промышленности. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 120 с.
2. Получение изображения объектов с использованием обратнорассеянного рентгеновского излучения / Ю.И. Дудчик, Г.И. Хилько, П.В. Кучинский, А.Н. Новик, О.В. Крעותень // Материалы 10-ой Межд. научно-техн. конференции «Приборостроение – 2017» БНТУ. – Минск, 2017. – С. 23–25.

УДК 621

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ПОЛИМЕРОВ**Морозов Д.А.¹, Кмита К.Ю.², Пантелеев К.В.¹,**¹Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

²ОАО «Газпром трансгаз Беларусь»

Минск, Республика Беларусь

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований параметров пространственного перераспределения поверхностного электростатического потенциала полимерных материалов при механическом растяжении. Исследования проводили на установке, реализующей сканирующий режим зонда Кельвина, разработанной в Белорусском национальном техническом университете. В качестве системы нагружения использован разработанный и изготовленный макет системы для растяжения образцов.

На рисунке 1 приведена твердотельная модель разработанной в САПР SolidWorks система нагружения образцов, предназначенной для работы в составе системы сканирования электростатических потенциалов. На рисунке 2 приведен внешний вид изготовленного макета и его использование в процессе измерения пространственного распределения электростатического потенциала полимерного образца.

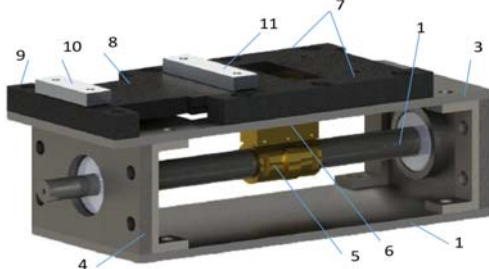


Рисунок 1 – Твердотельная модель системы для растяжения полимерных образцов:

1 – винт; 2 – нижнее основание; 3 – верхнее основание; 4 – основания под направляющую с подшипником; 5 – гайка; 6 – соединитель; 7 – направляющие; 8 – подвижный стол; 9 – пластина с держателем образцов; 10 – неподвижный зажим; 11 – подвижный зажим

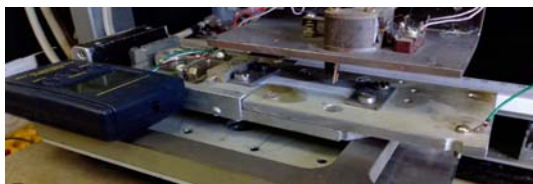


Рисунок 2 – Внешний вид макета системы растяжения полимерных образцов в процессе измерения поверхностного электростатического потенциала

Установка для растяжения образцов из полимерных материалов состоит из нижнего 2 и верхнего 3 оснований, между которыми установлены 2 основания под подшипник 4, в которых через

подшипники закреплен винт 1. На верхнем основании 3 закреплены направляющие 7, по которым перемещается стол 8. Так же на верхнем основании 3 закреплена пластина под зажим 9 таким образом, чтобы она была той же высоты, что и стол 8 и была неподвижна относительно него. С помощью малого зажима 10 и большого зажима 11 оба конца исследуемого образца закрепляются на пластине 9 и столе 8 соответственно. При вращении винта 1 гайка 5 перемещается вдоль его оси и при помощи соединителя 6 перемещает стол 8 по рельсам 7, тем самым растягивая образец.

В качестве измерителя нагрузки использован тензометрический датчик из бытовых весов «Portable Electronic Scale» (рисунок 2). Согласно техническим характеристикам, диапазон измерений датчика составляет от 10 грамм до 40 килограмм с точностью от 10 грамм. Для определения нагрузки при растяжении образцов тензометрический датчик сопряжен с ходовым винтом через упругий элемент (пружину). Пружина обеспечивает плавное нагружение. Из дополнительных функций датчик имеет возможность блокировки веса. Функция нужна для сохранения показаний датчика в момент разрыва образца. Также возможно измерение температуры окружающей среды, что наравне с влажностью имеет важное значение при испытании полимерных материалов.

В качестве образца для экспериментальных исследований использован листовый фторопласт-4 толщиной 1 мм, изготовленный в форме двойной лопатки, ширина узкой области составила 5 мм.

Сканирование распределения поверхностного потенциала выполняли после каждого шага нагружения, равного 2 кгс. Полный разрыв образца, вследствие ограничения хода винта, достигнут не был. Результаты измерений представлены в виде топографических карт, приведенных на рисунке 3. Статистическая обработка измерительных данных проведена путем построения гистограмм распределения поверхностного электростатического потенциала на каждом из этапов нагружения образцов (рисунок 4).

Из карт распределения потенциала обнаружено изменение как параметров распределения потенциала (увеличение области локализации), так и рост численного значения в области шейки. Наблюдаемый эффект согласуется с тем, что механическое растяжение приводит к изменению компактности структуры материала и, следовательно, к изменению объема, занимаемого сво-

бодными электронами, что приводит к перераспределению потенциала, как и в случае металлов [1–4]. Из гистограмм видно, что в общем случае характер распределения нормальный. При этом с увеличением нагрузки наблюдается рост асимметрии в лево, т.е. рекомбинация электронов на различных структурных уровнях проявляется в виде смещения поверхностного потенциала в область действия механических напряжений. При 5 кгс (рисунок 3, *е* и 4, *е*), наблюдается максимальное относительное значение потенциала (–60 мВ), сосредоточенного в области локализации механических напряжений. При дальнейшем

увеличении нагрузки экстремум не превышает по модулю (–50 мВ). Таким образом при нагружении с относительным значением 5 кгс происходит некоторое насыщение, при котором дальнейший рост потенциала не наблюдается. Также, при этом, гистограмма распределения имеет аномальный пик. Из карты распределения, соответствующей нагрузке 5 кгс (рисунок 3, *е*) видно, что распределение относительно однородно по поверхности образца. Вероятно, на данном этапе испытания происходит переход от одного вида преобладающего деформирования к другому (от пластического к упругому).

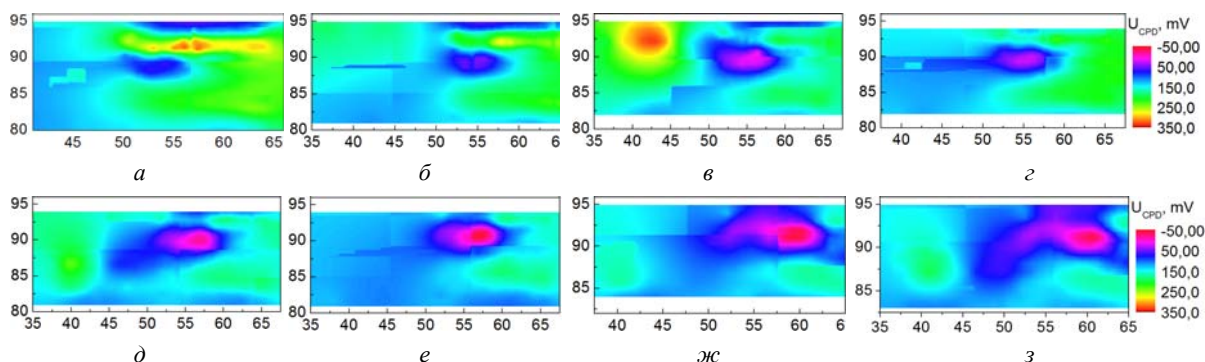


Рисунок 4 – Карты пространственного распределения поверхностного электростатического потенциала образца из фторопласта-4 при механическом растяжении:

а – 0,1 кгс; *б* – 1 кгс; *в* – 2 кгс; *г* – 3 кгс; *д* – 4 кгс; *е* – 5 кгс; *ж* – 6 кгс; *з* – 7 кгс

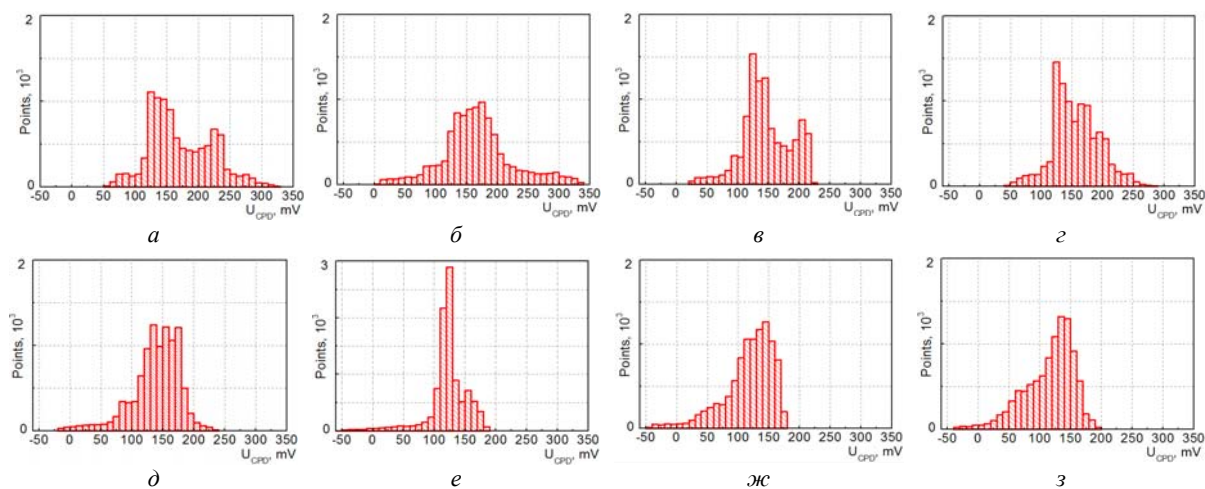


Рисунок 5 – Гистограммы пространственного распределения поверхностного электростатического потенциала образца из фторопласта-4 при механическом растяжении:

а – 0,1 кгс; *б* – 1 кгс; *в* – 2 кгс; *г* – 3 кгс; *д* – 4 кгс; *е* – 5 кгс; *ж* – 6 кгс; *з* – 7 кгс

Результаты эксперимента показывают возможность использования зарядочувствительных методов для контроля напряженно-деформационного состояния полимерных материалов, для изучения механизмов зарождения и распространения деформационных дефектов в объеме материала и поверхности, а также закономерностей протекающих при этом процессов.

Литература

1. Zharin A., Pantiayeu K., Opielak M., Rogalski P. Charge sensitive techniques in tribology studies. *Przeгляд Elektrotechniczny* 92 (11), 2016, 239–243.

2. Тявловский А.К., Пантелеев К.В., Жарин А.Л. Методы зондовой электрометрии для разработки и исследования свойств перспективных материалов. *Перспективные материалы и технологии*, 2015, с. 381–394.

3. Zharin A., Pantiayeu K., Kierczyński K. Charge sensitive techniques in control of the homogeneity of optical metallic surfaces. *Przeгляд Elektrotechniczny*, 92 (8), 2016, pp. 190–193.

4. Жарин А.Л., Пантелеев К.В., Свистун А.И. Исследование локальных деформаций материалов методами зондовой электрометрии при различных видах нагружения. *Современные методы и технологии создания и обработки материалов*, 2015, с. 39–46.

СТЕНД ИСПЫТАНИЯ ПЛИТКИ

Есьман Г.А.¹, Габец В.Л.¹, Mohamed Seiab Mahan²

Ахмед Мохаммед Саяб Саяб¹

¹Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

²University of Al Qadisiyah

Iraq

Керамическая плитка нашла свое применение практически во всех строительных сооружениях, как извне, так и внутри них. Ею облицовывают санитарные узлы, кухни, полы, фасад зданий. Керамическая плитка имеет как, эстетические, так и практические свойства [1].

Лабораторные испытания керамической плитки достаточно обширны и имеют большое количество критериев в зависимости от типа керамической плитки, способа и места её применения, температурных условий, влажности, износостойкости и других условий по ГОСТ 27180. Ниже приведены наиболее распространенные испытания керамической плитки [1, 2].

Определение размеров, правильности формы и качества поверхности. Эти испытания включают:

- определение толщины, длины, ширины плитки и величины рифления, которые должны соответствовать размерам предъявленным изготовителем;
- измерение прямолинейности граней;
- измерение косоугольности плитки – отклонение формы плитки от прямоугольной по сравнению с калибровочной плитой;
- измерение кривизны лицевой поверхности плиток, включая выпуклость, вогнутость и коробление;
- определение качества лицевой поверхности, то есть отсутствие каких-либо визуальных дефектов.

Водопоглощение определяют путем погружения плитки на определенное время в кипящую воду и затем вычисляют исходя из результатов взвешивания керамических плиток в сухом и насыщенном водой состоянии.

Под воздействием температуры расширяются не только материал плитки, но и бетонная стяжка, на которую она положена, и чтобы компенсировать разное линейное расширение материалов, делаются специальные температурные швы.

Помимо теплового равномерного расширения необходимо не забывать также и о требованиях к резким перепадам температуры. Особенно актуально это в помещениях, где происходит частая смена температур в связи с обилием пара, к примеру, ванны, сауны, кухня, поставленный горячий чайник или кастрюля на керамическую плитку.

Лабораторные испытания проводят с помощью десятикратного нагревания и последующим охлаждением в температурных пределах 15–110°C. При технологическом испытании плитки с глазурованной поверхностью возможны небольшие разрывы слоев глазури, вследствие расхождения коэффициентных показателей между смесью плитки и самой глазури.

Устойчивость к образованию трещин (кракелюров) выявляют только у глазурованной керамической плитки, на поверхности которой со временем появляются кракелюры. Если плитка не гладкая и монотонная, а имеет какую-то рельефную поверхность, то микротрещина сразу не видна и станет заметна только в процессе эксплуатации.

Чтобы это предотвратить и выявить плитку с дефектной глазурью, проводятся лабораторные испытания: образец плитки помещается в промышленный автоклав, после чего в нем закачивают давление 0,5 МПа (при температуре в 160 °С) и выдерживают около часа. Для лучшего распознавания дефектов, поверхность глазури покрывают метиленовой синью.

Химическая стойкость обуславливается нанесением на поверхность плитки различных химически активных веществ, в основном кислоты (лимонная, соляная, молочная), если плитка предназначена для использования в плавательных бассейнах, то плитка подвергается дополнительному испытанию добавками, использующиеся в бассейнах.

Морозостойкость – важный показатель для свойств керамической плитки, использующейся на улице либо же в холодильных и морозильных камерах. Лабораторные испытания проводятся с помощью использования десяти одинаковых экземпляров плитки, которые опускаются в камеру с постоянными колебаниями температур в пределах от +15 °С до –15 °С.

Перед помещением в камеру, их несколько часов замачивают в воде, чтобы все поры пропитались влагой, и создалась более активная среда. Если в плитке окажется большой уровень пористости, то, впитанная вода, заполнившая пустоту при замерзании, расширится и велика вероятность будет повреждения плитки. Поэтому для этих целей больше всего подходит экструдированная керамическая плитка.

Стойкость к изнашиванию (истиранию) проводится путем трения вращающегося корундового диска об поверхность испытуемой плитки. В зависимости от оборотов абразивного диска и продолжительности трения определяют, соответствует ли допустимым нормам глубина получившейся канавки.

Твердость поверхности по шкале Мооса показывает сопротивляемость плитки на образования царапин, порезов, сколов и других изъянов при механическом воздействии. Поверхность испытывается десятью минералами, начиная от самого твердого, и по очереди переходя на более мягкий, до тех пор, пока при царапании минералом не будет оставаться след на поверхности плитки. Плитке присваивается тот номер, который последним смог оставить царапину.

Следует учитывать тот факт, что износ поверхности более заметен на глянцевом покрытии. Соответственно в местах, подвергающимся большим износам, целесообразнее использовать матовую поверхность, а еще лучше, чтобы при этом она имела рельефность.

Прочность плитки, то есть ее сопротивляемость при изгибе также немаловажный показатель качества, который в первую очередь важен для плитки, используемой на полу.

Сущность метода заключается в определении разрушающего усилия, разрушающей нагрузки и предела прочности при изгибе керамической плитки посредством приложения с определенной скоростью усилия на середину плитки, при этом точка приложения усилия должна находиться в контакте с лицевой поверхностью керамической плитки.

Его проводят с помощью специального приспособления, имеющего два цилиндрических опорных стержня на которые устанавливают плитку и третьего стержня, передающего усилие в центр плитки сверху вниз.

Усилие производят плавно, увеличивая каждую секунду на 1 Н/мм². Предел прочности фиксируют и сверяют с установленными показателями.

Разработанный стенд испытания керамической плитки на определение предела прочности при изгибе и разрушающей нагрузки (рисунок 1) состоит из узла нагружения, включающего гидроцилиндр 11, нагрузитель 8 с подпружиненной скалкой 10, узла регулировки стенда на различный типоразмер плитки, состоящий из кареток 4, винтовых пар 3 с маховиками 1, тензометрических датчиков 5 с опорами 6 и блока управления.

Керамическая плитка устанавливается на опоры 6 рабочей поверхностью вверх. Опоры установлены на каретке 4, связанной с тензодатчиком, который измеряет усилие на периферии плитки. Перемещение кареток на соответствующий размер плитки осуществляется маховика-

ми через винтовые пары и устанавливается по шкале 12. Нагружение плитки осуществляется нагрузителем 8 с помощью гидроцилиндра 11.

Для расчета среднего значения разрушающей нагрузки и среднего предела прочности при изгибе допускается использовать результаты испытания только тех образцов, которые были разрушены в центральной продольной зоне [2], соответствующей 1/3 расстояния между опорами.

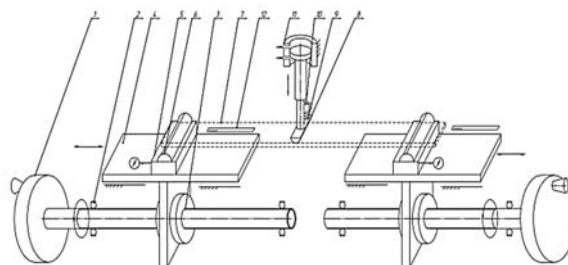


Рисунок 1 – Стенд для испытания плитки:
1 – маховик; 2 – опора; 3 – винтовая пара; 4 – каретка;
5 – тензодатчик; 6 – опора; 7 – образец;
8 – нагрузитель; 9 – пружина; 10 – скалка;
11 – гидроцилиндр; 12 – шкала

Для расчета среднего значения требуется не менее пяти учитываемых результатов для плиток площадью не более 3 600 см², не менее семи учитываемых результатов для плиток площадью более 3 600 см² с рабочей толщиной менее 7,5 мм и три учитываемых результата для плиток площадью более 3 600 см² толщиной не менее 7,5 мм.

Разрушающую нагрузку S вычисляют по формуле (1).

$$S = \frac{F \cdot L}{b}, \quad (1)$$

где F – разрушающее усилие, Н; L – расстояние между опорными стержнями, мм; b – ширина испытуемых образцов, мм.

Предел прочности при изгибе вычисляют по формуле:

$$\sigma = \frac{3F \cdot L}{2bh^2} = \frac{3S}{2h^2}, \quad (2)$$

где F – разрушающее усилие, Н; L – расстояние между опорами, мм; b – ширина испытуемых образцов, мм; h – наименьшая толщина испытуемых образцов вдоль линии разрушения, мм.

Среднее значение разрушающей нагрузки и среднее значение предела прочности при изгибе образцов рассчитывают по полученным результатам.

Литература

1. Испытание керамической плитки // Центр независимых строительных экспертиз [Электронный ресурс]. – 2020. – Режим доступа <https://centerekspert.ru/ispitatelnaya-laboratoriya/ispytanie-keramicheskoy-plitki>. – Дата доступа: 10.10.2020.
2. ГОСТ 27180-2001. Плитки керамические. Методы испытаний. – Москва: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2002. – 26 с.

АВТОМАТ СОРТИРОВКИ ШТИФТОВ

Есьман Г.А., Габец В.Л., Муминбоев Азимджон

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Автоматизация производственных процессов представляет собой высшую ступень развития машино- и приборостроительного производства. Полная автоматизация процессов производства представляет собой наивысший уровень автоматизации, при котором происходит передача всех функций техническим приборам, но контроль над процессами осуществляет человек [1].

Она позволяет добиться резкого повышения производительности труда при одновременном увеличении качества произведенной продукции.

Особенно важна автоматизация контрольных операций так как она повышает не только производительность контроля, но и достоверность за счет исключения влияния субъективных факторов.

Современное высокоточное массовое и крупносерийное производство требует создания соответствующих высокоточных и производительных контрольных систем, позволяющих работать с объектами в широком диапазоне размеров.

Представленный на рисунке 1 контрольно-сортировочный автомат предназначен для сортировки цилиндрических штифтов на 7 групп по диаметру (1–20 мм) и длине (10–80 мм) с допустимой точностью 1 мкм и производительностью до 60 шт/мин.

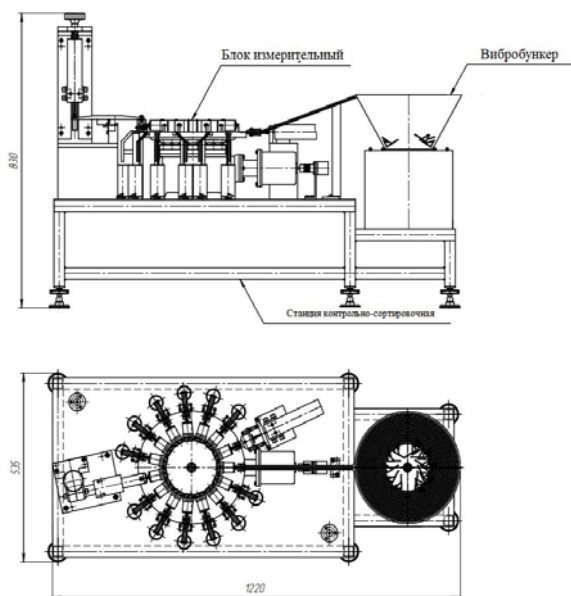


Рисунок 1 – Общий вид автомата сортировки штифтов

Автомат включает станцию контрольно-сортировочную и стол, на котором установлены: блок управления и обработки информации, отсчетно-командное устройство и монитор.

На станции контрольно-сортировочной смонтированы: вибробункер и блок измерительный, связанные лотком 6 (рисунок 2). Блок измерительный (рисунок 2) состоит из узла поворота стола, узла сортировки, узла контроля длины и узла контроля диаметра штифта.

Автомат сортировки штифтов работает следующим образом. Детали засыпаются в чашу вибробункера 1 (рисунок 2), на внутренней поверхности которой расположен специальный лоток.

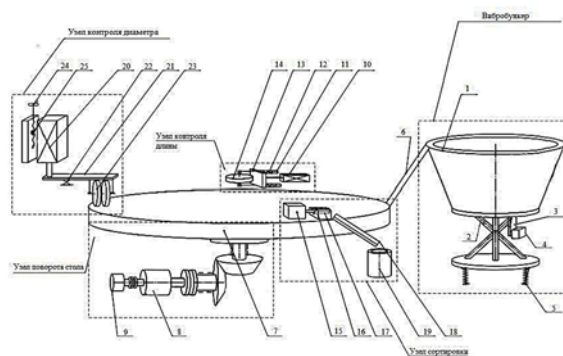


Рисунок 2 – Станция контрольно-сортировочная:

- 1 – чаша бункера; 2 – стержни; 3 – кронштейн;
- 4 – магнит; 5 – пружины; 6 – лоток; 7 – поворотный стол; 8 – двигатель; 9 – датчик положения стола;
- 10 – преобразователь; 11 – направляющая;
- 12 – пружина; 13 – кронштейн; 14 – ролик;
- 15 – магнит; 16 – призма; 17 – контролируемая деталь;
- 18 – лоток; 19 – сортировочный отсек;
- 20 – преобразователь; 21 – рычаг; 22 – опора;
- 23 – ролик; 24 – маховик; 25 – винтовая пара

Штифты, засыпанные в чашу бункера, скользят по коническому днищу к стенкам чаши. Вибрирующая поверхность чаши бункера заставляет заготовки перемещаться по лотку вверх.

Днище укреплено на трех наклонных цилиндрических пружинных стержнях 2, расположенных таким образом, что проекции их на горизонтальную плоскость перпендикулярны к радиусам в точках крепления их к днищу чаши. Привод питателя вибробункера осуществляется от трех электромагнитных вибраторов 4. Для виброизоляции все грузочное устройство установлено на спиральных цилиндрических пружинах 5 сравнительно небольшой жесткости. Пружинные стержни, соединяющие чашу с нижней плитой, являются упругим элементом двухмассовой колебательной системы. Собственная частота этой системы настраивается на 3–5 % выше частоты возмущающего усилия, чем достигается стабильность работы устройства при сравнительно малой величине возмущающего усилия.

Наклонное расположение стержней по окружности обуславливает колебания чаши по винтовой траектории, чем достигается перемещение деталей вверх по спиральному лотку чаши.

Детали на выходе из чаши вибробункера падают на лоток 6, который направляет их к поворотному столу 7. В столе выполнены пазы, в которых установлены призмы с упорами, по которым устанавливается деталь.

Поворот стола осуществляется от электродвигателя 8 через конический редуктор и контролируется датчиком положения 9.

Измерение деталей по длине обеспечивается индуктивным преобразователем 10 через кронштейн 13 с роликом 14, который перемещается по направляющим 11 и поднимается к торцу измеряемой детали пружинами 12. После контроля деталь 17 в призме 16 поворотным столом перемещается на сортировочную позицию, где элект-

ромагнитом 15 по лотку 18 сбрасывается в соответствующий сортировочный отсек.

Контроль детали по диаметру осуществляется индуктивным преобразователем 20 через рычаг 21, установленный на упругой опоре 22 и подпружиненные ролики 23. Положение роликов по отношению к поверхности детали регулируется маховиком 24 через винтовую пару 25. После измерения происходит сортировка деталей по диаметру аналогично сортировке по длине.

Достоинством автомата является возможность контроля цилиндрических штифтов как по длине, так и по диаметру в широком диапазоне размеров.

Литература

1. Хлебных Л.В. Автоматизация производства в современном мире / Л.В. Хлебных, М.А. Зубкова, Т.Ю. Саукова. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2017. – № 16 (150). – С. 308–311.

УДК 004.384

ВНЕДРЕНИЕ ФУНКЦИЙ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ В КОНЦЕПЦИЮ «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ДОМ»

Зайцева Е.Г., Чернецкий М.В., Шевель Н.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Развитие концепции «интеллектуальный дом» подразумевает сохранение и улучшение здоровья человека. Успешными предпосылками для решения данной задачи является с одной стороны достаточно высокое развитие технической базы, с другой – начало перехода к дистанционной медицине [1].

В настоящее время расширение возможностей в рамках концепции достигается встраиванием в уже существующее жилое помещение соответствующих информационно-технических модулей [2].

Тактика встраивания модулей в уже существующие жилые помещения обусловлена необходимостью привязки к ним и приемлема на переходном этапе. В то же время изменение концепции всего жилого здания позволит значительно повысить эффективность выполнения функций «интеллектуального дома», в том числе и в области оздоровления.

На рисунке 1 отражена структура функций здравоохранения, которые необходимо заложить в систему «вновь проектируемый интеллектуальный дом». Встраиваемые системы и модули можно разделить на 2 группы. Первая связана с диагностикой состояния человека. Вторая предусматривает терапию и профилактику заболеваний.

В области медицинской диагностики известны и широко используются методики дистанционного контроля сердечно-сосудистой системы, так как процедура измерения артериального дав-

ления (АД) достаточно проста и может производиться самостоятельно в домашних условиях [3]. Дистанционный мониторинг АД производится на основе компьютерной системы, которая автоматически отправляет пациентам запросы об уровне АД в виде текстовых сообщений мобильной телефонной связи. Полученные с помощью текстовых сообщений от пациентов данные об уровне АД сохраняются в системе, автоматически обрабатываются, и врач на основании полученной информации при необходимости производит коррекцию терапии. Существуют предпосылки для дистанционной диагностики пульмонологических заболеваний [4, 5].

Рассмотрим основные возможности и содержание информационно-технических модулей первой группы. Системы диагностики для «интеллектуального дома» подразделяются на общие и для пациентов с хроническими заболеваниями.

В первом случае имеются в виду диагностические обследования, которые необходимо систематически проводить каждому пациенту, во втором – дополнительные, в которых нуждаются люди с хроническими заболеваниями.

К систематически проводимым исследованиям можно отнести те, которые входят в состав ежегодной диспансеризации и при этом могут проводиться дистанционно, а также другие, возможность проведения которых обусловлена наличием необходимой технической базы.

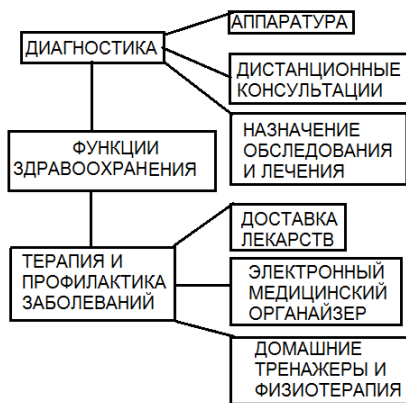


Рисунок 1 – Основные функции здравоохранения «интеллектуального дома»

В домашних условиях возможно дистанционно проводить систематическое обследование уровня слуха, остроты зрения, аускультацию дыхательных путей, мониторинг артериального давления, измерение кардиограммы, миограммы. С применением видеотехники возможны обследования, связанные с состоянием осанки человека и его моторикой. Для некоторых из перечисленных исследований [3, 4] уже существует информационно-техническая база, для других возможно ее создание с учетом уровня развития техники и цифровых технологий. Естественно, требуется нормирование технических характеристик диагностических устройств и создание соответствующей нормативной базы.

В этой группе исследований особое место занимают исследования крови и т. д. Возможным вариантом проведения такой группы анализов является наличие домашних электронных анализаторов с функцией установления личности пациента. Расходные материалы для анализаторов могут доставляться в соответствии с графиком анализов и дополнительно в случае необходимости. Отработанные реагенты подлежат обратной доставке и утилизации. При наличии соответствующей инструкции и возможности дистанционной консультации указанная манипуляция не является сложной, о чем можно судить на примере применения домашних глюкометров.

Пациенты, обладающие рядом хронических заболеваний, могут получать в пожизненное пользование специальные диагностические модули.

Система терапии заболеваний в домашних условиях предусматривает фармацевтическое и физиотерапевтическое воздействие. Наличие системы электронных рецептов позволяет создать системы доставки лекарств и контроля их приема. При этом удобно использовать соответствующее программное обеспечение как для напоминаний о приеме, так и для обратной связи со специалистом в случае необходимости корректировки дозы приема.

В настоящее время имеется ряд физиотерапевтических аппаратов, предназначенных для домашнего использования, например, для дарсонвализации, магнитотерапии, вибро- и акустического массажа. Эти аппараты не имеют обратной связи с пациентом и со специалистами. Корректное проведение физиотерапевтических процедур требует соответствующего совершенствования такой аппаратуры для возможности учета индивидуальных особенностей пациента. Кроме того, в жилом помещении имеются возможности для проведения других процедур, например тепловых, криотерапии, гидромассажа и т.д. Такие аппараты могут представлять собой насадки к существующей бытовой технике.

Основными направлениями профилактики заболеваний в рамках концепции «интеллектуальный дом» является создание тренировочных модулей и обеспечение режима адаптивного питания. Создание тренировочных модулей предусматривает учет индивидуальных особенностей обитателей дома. Линейка соответствующих тренажеров должна также, как и физиотерапевтическая аппаратура, иметь опции обратной связи с пациентом и со специалистом. Эта система должна быть адаптивной, т.е. иметь возможность изменения параметров тренировки в соответствии с состоянием пациента. Возможно создание унифицированного ряда тренажеров, сконструированных по модульному принципу, а также разработка в случае необходимости индивидуальных тренажеров. Для детей по мере их роста необходимо предусмотреть возможность коррекции параметров тренажеров. Рациональным техническим решением является создание адаптивной мебели, которая в качестве опции выполняет функции тренажера, что позволит уменьшить загруженность пространства.

Создание системы адаптивного питания требует принятия большого количества решения в рамках надсистемы «интеллектуальная среда обитания», так как обоснование рациона человека требует информации о состоянии его здоровья (медицинская карточка), его финансовых возможностях (информация о доходах), о индивидуальной приемлемости различных типов продуктов этнического характера и т.д., причем эта информация является переменной по времени. Её наличие позволяет разработать соответствующий рацион. После одобрения его пользователем заказ на продукты или готовые блюда (в зависимости от намерений пользователя) поступает в торговое учреждение и доставляется с помощью беспилотного транспорта.

Отдельная система опций в рамках «интеллектуального дома» должна быть создана для людей с ограниченными возможностями и людей преклонного возраста.

Очевидно, что расширение концепции «интеллектуальный дом» возможно при сотрудничестве специалистов по строительству и архитектуре с медицинскими специалистами, разработчиками медицинской и бытовой техники, мебели, осветительной аппаратуры, энергоснабжения.

Литература

1. Лемешко В.А. Телемедицина: здравоохранение делает шаг в будущее / В.А. Лемешко, Т.С. Тепцова // Медицинские технологии. Оценка и выбор. – 2017. – № 4(30). – С. 30–38. Режим доступа: http://mt-choice.ru/mt_30_2017-4/. – Дата доступа: 5.01.2020.

2. Серикова М.В. К вопросу модульного построения систем обеспечения умного дома / М.В. Серикова, В.А. Атрощенко, Н.Д. Чигликова // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 10–1. – С. 45–50. – Режим

доступа: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41787>. – Дата доступа: 5.01.2020.

3. Оценка эффективности технологии дистанционного мониторинга артериального давления у больных артериальной гипертонией на основе показателей выполнения клинических рекомендаций / О.М. Посенкова [и др.] // Качество в кардиологии. – 2015. – № 2. – С. 1–5. Doi: 10.15275/cardioit.2015.0203.

4. Zaitseva E.G. On the Possibility of Remote Diagnostics of the Respiratory System by Auscultation / E.G. Zaitseva, M.V. Chernetsky, N.A. Shevel. Devices and Methods of Measurements, 2020, vol. 11, no. 2, pp. 148–154. Doi: 10.21122/2220-9506-2020-11-2-148-154.

5. Дьяченко, А.И. Респираторная акустика (обзор) / А.И. Дьяченко, А.Н. Михайловская // Труды ИОФАН. – 2012. – Т. 68. – С. 136–181. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://readera.ru/trudy-iofan/2012-68>. – Дата доступа: 21.08.2019.

УДК 621.3.049.77: 681.586

БЕСПРОВОДНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ УДАЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Здоровцев С.В., Кушнеров Д.П., Сушко В.А.

ОАО «МНИПИ»

Минск, Республика Беларусь

В работе представлены результаты разработки и исследования беспроводной системы контроля параметров удаленных объектов (БСКП), предназначенной для сбора, обработки и хранения данных, полученных о состоянии объектов и окружающей среды с помощью функциональных электронных модулей контроля физико-химических параметров [1].

БСКП построена по модульному принципу, предусматривающему определенный набор элементов: модуль центрального процессора (регистратора), дополнительные модули памяти, модули интерфейса, функциональные измерительные модули, сенсорные элементы и устройства [2]. В этом случае каждой процедуре присваивается имя, и она оформляется в виде стандартного программного модуля, выполняющего четко определенную функцию. Модульное построение системы имеет и другое преимущество. Пользуясь одним и тем же общим набором модулей, можно в принципе построить из них различные структуры, соответствующие решению разных задач. При этом необходимо учитывать ряд особенностей при решении измерительных задач, основным из которых является необходимость учета динамики реализации модулей и вызова в оперативную память соответствующих массивов в целом или их частей. Время обмена с внешней памятью при модульном построении системы складывается из времени обмена при вызове модулями необходимых информационных массивов, а также времени записи и считывания промежуточных результатов работы системы модулей.

Модульное построение БСКП обеспечивает ряд преимуществ при выполнении процесса измерения, регистрации, обработки контрольных данных:

- расширение числа функций, реализуемых в БСКП;
- наращивание аппаратных средств, а также возможность модернизации аппаратных модулей и их замены более совершенными устройствами;
- обеспечение независимости метрологических характеристик каналов измерения от внешних каналов обмена информацией;
- организация сетевого протокола обмена данными по каналам обмена информацией;
- возможность модернизации и развития прикладного программного обеспечения.

Структурная схема БСКП представлена на рисунке 1.

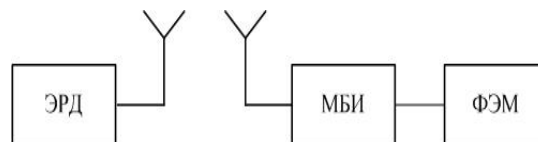


Рисунок 1 – Структурная схема БСКП

Измерения физико-химических параметров осуществляется с помощью функциональных электронных модулей (ФЭМ), включающих сенсорные элементы и блок АЦП, осуществляющий оцифровку измерительной информации. Измерительная информация в виде пакета цифровых данных из ФЭМ поступает в модуль беспроводного интерфейса (МБИ), который обеспечивает

беспроводную связь с электронным регистратором данных (ЭРД).

Структурная схема МБИ представлена на рисунке 2.

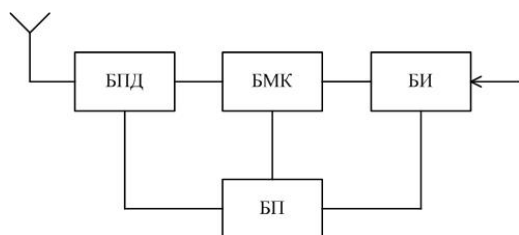


Рисунок 2 – Структурная схема МБИ

Логику обмена данными между ФЭМ и МБИ выполняет блок микроконтроллера (БМК) на базе микросхемы STM32F407VGT6TR. Питание функциональных блоков МБИ осуществляется автономным блоком питания (БП), выполненным на микросхемах MCP73831T (контроллер заряда батареи), NCP551SN33T1G (линейный стабилизатор напряжения), LM27313DBV (импульсный повышающий стабилизатор напряжения до 5 В для питания ФЭМ). Блок интерфейса (БИ) содержит схему задержки включения шины USB, которая необходима для последовательного замыкания линий питания и передачи данных. Передача данных на ЭРД осуществляется по протоколу беспроводной связи Bluetooth. С этой целью в блоке передачи данных (БПД) применен модуль связи HC-06. В качестве ЭРД может быть использован электронный планшет или смартфон с установленным прикладным ПО. Основные требования к операционной системе ЭРД – Android 7.0 и выше. Вывод данных на панели ЭРД осуществляется в цифровой и графической форме с последующим запоминанием и формированием архивов данных.

На рисунке 3 представлен внешний вид макета БСКП в составе: планшетного компьютера, модуля беспроводного интерфейса, функциональных электронных модулей контроля водородного показателя растворов, температуры и относительной влажности окружающей среды.



Рисунок 3 – Внешний вид макета БСКП

Исследования БСКП были проведены для режимов контроля водородного показателя рас-

творов, температуры и относительной влажности окружающей среды.

Для контроля температуры окружающей среды использовался ФЭМ, в котором в качестве чувствительного элемента использован микроэлектронный датчик DS18B20. Контроль температуры производился в диапазоне от -30 до $+60$ °. На рисунке 4 представлен фрагмент информационного окна ЭРД в режиме контроля температуры.

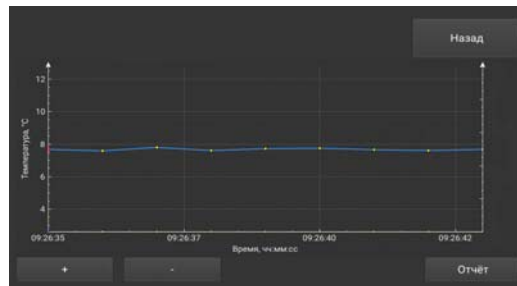


Рисунок 4 – Фрагмент информационного окна ЭРД в режиме контроля температуры



Рисунок 5 – Фрагмент информационного окна ЭРД в режиме измерения относительной влажности

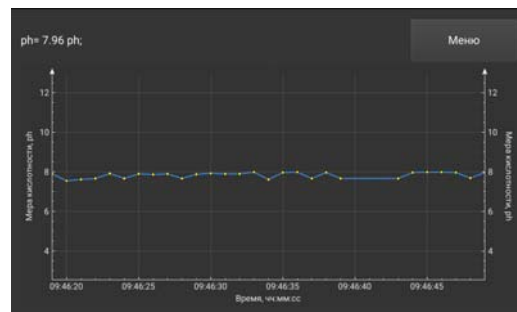


Рисунок 6 – Фрагмент информационного окна ЭРД в режиме измерения водородного показателя растворов

Для контроля относительной влажности окружающей среды использовался ФЭМ, в котором в качестве чувствительного элемента использован микроэлектронный датчик НН-4 000-003. Контроль относительной влажности производился в диапазоне от 10 до 100 %. На рисунке 5 представлен фрагмент информационного окна ЭРД в режиме контроля относительной влажности с одновременным контролем температуры.

Для контроля водородного показателя растворов использовался ФЭМ, к которому через входной усилитель НР 4502С был подключен электрод-зонд. Контроль водородного показателя растворов производился в диапазоне от 0 до 12 ед. рН. На рисунке 6 представлен фрагмент информационного окна ЭРД в режиме контроля водородного показателя растворов.

Разработанная БСКП может быть использована как для промышленного применения, так и для выполнении физических и химических экспериментов в научных и учебных лабораториях. Прикладное ПО обеспечивает математическую обработку полученных данных и их отображение на экране планшетного компьютера или смартфона числовом и графическом виде. Предложенное

техническое решение повышает наглядность выполнения экспериментов, предоставляет дополнительные возможности по автоматической обработке данных и анализу полученных результатов.

Литература

1. Здоровцев С.В., Кушнеров Д.П., Сушко В.А. Информационно-измерительная система на базе цифровых функциональных электронных модулей // Материалы 11-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение 2018 г. Минск 14–16 ноября 2018 г. – Минск: БНТУ, 2018. – С 17–19.

2. Крюков В.В. Информационно-измерительные системы / В.В. Крюков. – Владивосток: ВГУЭС, 2000. – 102 с.

УДК 621.396.96

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Зеленко В.В., Исаев А.В., Суходолов Ю.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Носителем информации о значениях физических величин в пределах измерительной системы являются сигналы. Точность измерений зависит от объекта измерений, способов измерений, аппарата обработки и анализа результатов, стабильной работы генераторов измерительных сигналов.

Широкое применение в качестве измерительных сигналов получили периодические последовательности прямоугольных импульсов, которые, исходя их практики, можно считать квазипериодическими, у которых период или другие параметры могут изменяться и варьироваться вокруг их средних значений.

Трудность обеспечения стабильной работы генерирующей аппаратуры связана со случайными изменениями параметров измерительных сигналов с течением времени в некоторых пределах. Вариации параметров сигналов генераторов в дальнейшем могут привести к неточностям при анализе выходных сигналов, снимаемых с объектов измерений. Так, при испытаниях обмоток статоров асинхронных электродвигателей на витковые замыкания применение в качестве тестовых сигналов периодических последовательностей прямоугольных импульсов позволяет получить высокую чувствительность при контроле и создать максимальные испытательные напряжения в обмотке. Тестовые сигналы подаются на вывод обмотки и корпус магнитопровода. Выходным сигналом является напряжение на контролируемой обмотке. Фронтом импульса возбуждаются высокочастотные колебания, протекающие с двумя частотами – сначала с f_2 , а далее до затухания

с f_1 . Точность контроля достигается путем обеспечения максимальной чувствительности к витковому замыканию в обмотке статора и минимальной чувствительности к технологическим разбросам параметров обмотки и нестабильности параметров тестовых сигналов генераторов.

Оценить изменения параметров тестовых сигналов можно во временной области визуально при помощи осциллографов и в частотной области проведя анализ спектрального состава сигнала с помощью спектрометров.

Большинство методов, применяемых при измерении временных интервалов между периодическими последовательностями импульсов связаны с измерениями во временных областях, при этом точность измерений в некоторых случаях не достаточно для решения технических задач. Так, например, сложно оценить результат измерений изменений временных параметров сигналов за малый промежуток времени, величина которого не превышает порога дискретизации цифровых устройств измерения.

При таких условиях возникает необходимость в разработке методов для учета и измерения случайных изменений временных интервалов между периодическими последовательностями импульсов путем анализа в частотной области, что позволит повысить точность оценки их изменения во времени.

Измерить временные интервалы можно применив осциллографические и электронно-счетные методы. К осциллографическим методам измерения относятся методы с линейной или спиральной разверткой. Такие методы визуализи-

зируют результат измерения, но не позволяют регистрировать малые изменения временных интервалов. К электронно-счетным методам измерения относятся: метод последовательного счета, метод преобразования время-амплитуда, метод задержанных совпадений и метод преобразования масштаба времени (цифровой метод). К существенными недостаткам электронно-счетных методов можно отнести сложность измерения временных интервалов, меньших чем период квантования, сложность регистрации малых изменений временных интервалов, инерционность измерительных систем

В большинстве рассмотренных методов измерения временных интервалов в качестве тестовых сигналов используются импульсы прямоугольной формы. Однако на практике, из-за особенностей работы генерирующей аппаратуры, измерительные импульсы имеют фронты ненулевой длительности. Наличие этих фронтов снижает точность при измерениях и вносит погрешности, значения которых может достигать большой величины, в условиях, если длительность фронта импульса соизмерима с длиной измеряемого временного интервала. Очевидно, что для уменьшения погрешности измерений необходимо учитывать эту особенность и рассматривать при расчетах измерительные импульсы в общем случае как импульсы трапецеидальной формы. При этом, трапецеидальный импульс может быть представлен как результирующая сумма задержанных и урезанных по времени прямоугольных, треугольных или синусоидальных импульсов. Изменение угла наклона фронтов трапецеидальных импульсов, позволяет получить импульсы треугольной и прямоугольной формы, а изменение кривизны фронтов – импульсы синусоидальной и другой формы. Спектры таких сигналов имеют схожую структуру.

Результаты спектрального анализа рассмотренных сигналов позволяют применить единый математический аппарат для их исследования на основе выражений, описывающих периодические последовательности трапецеидальных импульсов.

Для определения времени задержки между двумя импульсными последовательностями предлагается использовать параметры спектра суммы этих сигналов. С использованием выражений [1] амплитуды спектральных компонент суммарного спектра двух задержанных последовательностей трапецеидальных импульсов можно рассчитать по формуле:

$$|A_n| = \frac{2A_m T}{\pi^2 n^2 t_\delta} \left| \sin\left(\frac{\pi n t_\delta}{T}\right) \right| \left| \cos\frac{\pi n t_\zeta}{T} \right| \left| \sin\frac{\pi n(\tau - t_\delta)}{T} \right|, \quad (1)$$

где $|A_n|$ – модуль амплитуды спектральной компоненты с номером n ; A_m – амплитуда сигнала; T – период следования трапецеидальных им-

пульсов; τ – длительность импульса; t_ζ – время задержки между двумя последовательностями трапецеидальных импульсов; t_δ – длительности переднего и заднего фронтов, в том случае, если они одинаковые.

Формула (1) показывает, что степень изменений отдельных спектральных компонент зависит от времени задержки между импульсными последовательностями t_ζ . Изменяя параметры T , τ , t_δ можно определить компоненты, чувствительность которых к изменению t_ζ будет максимальной, а к изменениям параметров импульсов, обусловленным нестабильностью генерирования, – минимальной [2].

Поиск спектральных компонент, имеющих максимальную чувствительность к изменениям измеряемого параметра и минимальную чувствительность к изменениям за счет нестабильной работы генераторов, позволит обеспечить возможность учета влияния дестабилизирующих факторов, обусловленных нестабильностью работы элементов измерительных систем. Определение номера спектральной компоненты сигнала, наиболее чувствительной к изменению контролируемого параметра, предусматривает исследование его спектра путем анализа частных производных выражения для расчета амплитуд его частотных составляющих [3]:

$$\Delta A_{nT} = \frac{d|A_n|}{dT} \Delta T + \frac{d|A_n|}{d\tau} \Delta \tau + \frac{d|A_n|}{dt_\delta} \Delta t_\delta + \frac{d|A_n|}{dt_\zeta} \Delta t_\zeta, \quad (2)$$

Где ΔT , $\Delta \tau$, Δt_δ – изменения параметров испытательных сигналов (T , τ , t_δ) за счет нестабильной работы генераторов, Δt_ζ – определяемое изменение времени задержки t_ζ . Первые три слагаемые формулы (2) являются абсолютной погрешностью при измерении информативного параметра сигнала Δt_ζ . Нахождение областей спектров, имеющих одновременно минимальную чувствительность к изменениям T , τ , t_δ и максимальную чувствительность к изменению t_ζ позволит устранить дестабилизирующих факторов за счет нестабильной работы генераторов при измерении.

Составив систему уравнений частных производных спектра суммы двух задержанных последовательностей трапецеидальных импульсов и построив графики зависимостей частных производных от номера спектральной компоненты спектра сигнала можно определить, что экстремумы функций производных $\frac{d|A_n|}{dT} \Delta T$,

$$\frac{d|A_n|}{d\tau} \Delta \tau, \quad \frac{d|A_n|}{dt_\delta} \Delta t_\delta, \quad \frac{d|A_n|}{dt_\zeta} \Delta t_\zeta \text{ не совпадают.}$$

Анализ системы уравнений производных спектров суммарного сигнала и графиков зависимостей частных производных позволит найти компоненты с одновременной максимальной чувствительностью к изменениям полезного сигнала и минимальной к нестабильности генерирующей аппаратуры.

Такой математический метод может быть применен на практике при испытаниях обмоток электродвигателей на витковые замыкания. С учетом того, что крутые фронты прямоугольных импульсов могут создать перенапряжения в обмотках и возможен пробой исправной изоляции, в дальнейшем, тестовые сигналы прямоугольной формы при испытаниях целесообразнее заменить на сигналы трапецидальной формы.

Рассматриваемый подход, основанный на спектральном анализе динамических свойств спектра суммы двух периодических последовательностей трапецидальных импульсов позволит повысить точность измерения временных интервалов между последовательностями импульсов путем определения погрешностей, обусловленных нестабильностью генерирования, и их ослабления.

Литература

1. Харкевич, А.А. Спектры и анализ / А.А. Харкевич. – М.: Физматлит, 1962. 236 с.
2. Глинченко, А.С. Исследование случайных погрешностей спектрально-веса измерения параметров сигналов / А.С. Глинченко, В.А. Комаров, О.А. Тронин // Цифровая обработка сигналов. – 2012. – № 1. – С. 7–11.

УДК 53.082.5

МАЛОГАБАРИТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙКИ ДИСКРЕТНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ

Иванов В.И., Иванов Н.И.

*НИИ ядерных проблем БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Получение цифровых изображений в различных областях спектра с высоким спектральным (гиперспектральным) разрешением имеет важное значение для решения широкого класса задач в лесном и сельском хозяйстве, аэрофотогеодезии, геологических изысканиях, мониторинге природной среды и оценке биологических рисков, энергетике, биомедицине [1]. Оперативность получения таких данных во многих случаях связана с необходимостью получения гиперспектральных изображений в полевых условиях, включая возможность осуществления воздушной разведки и мониторинга местности с небольших беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) – гексакоптеров, квадрокоптеров, БПЛА самолетного типа.

Большинство современных гиперспектрометров основано на применении дисперсионных элементов, таких как дифракционные решетки с необходимостью сканирования изображений целевой диафрагмой [2]. Широкий спектральный диапазон и высокое разрешение спектрометров данного типа делают их незаменимым инструментом в задачах космических исследований Земли [1], в высокоточных лабораторных исследованиях. Вместе с тем достаточно большие весо-габаритные характеристики, сложность юстировки и калибровки существенно затрудняют их применение для решения множества прикладных задач в полевых условиях, требующих более компактных приборов.

К классу таких компактных приборов можно отнести современные мультиспектральные цифровые камеры, которые представляют собой

комбинацию нескольких цифровых камер в одном корпусе с индивидуальными объективами и ПЗС-матрицами. Каждая из камер работает в своей спектральной полосе. Число спектральных каналов мультиспектральной камеры, как правило, не превышает 6. Например, камера Parrot Seguoia [3] работает на 4-х длинах волн: 550 нм, 660 нм, 735 нм, 790 нм с полосами пропускания 40 нм, 40 нм, 10 нм, 40 нм, соответственно; MAPIR Kernel 4 CameraArray – 4 канала, MAPIR Kernel 6 CameraArray – 6 каналов.

Недостаточное количество спектральных каналов и широкая полоса пропускания таких камер препятствуют их применению для гиперспектрального анализа изображений. Например, согласно [1], для гиперспектрального анализа изображений такие спектрометры должны иметь не менее 20 спектральных каналов с полосой пропускания не более 10–15 нм.

Перспективным направлением обеспечения компактности спектрометров изображений (изображающих спектрометров) с гиперспектральным разрешением является разработка спектрометров на основе линеек интерференционных перестраиваемых дискретных фильтров (LinearVariable Filters (LVF)) [4–7].

В настоящее время выпускается широкая номенклатура LVF с различными размерами, спектральным диапазоном и разрешением (производители Edmund Optics, Ocean Optics, Изовак Технологии и др.). Полоса пропускания таких LVF линейно изменяется в широком спектральном диапазоне с заданной дискретностью по одной из координат x или y , преимущественно по x – ко-

ординате (по длине линейки). В наших разработках такие LVF были впервые применены нами в компьютерных анализаторах изображений для биомедицинских исследований [8].

Разработанный спектрометр выполнен на базе LVF фирмы Edmund Optics (2018 год выпуска). Параметры фильтра: длина линейки фильтра $x = 60$ мм; ширина $y = 18$ мм; число дискретных фильтров в линейке $n = 60$, спектральный диапазон перестройки $\lambda = 300\text{--}700$ нм; геометрический шаг дискретной перестройки $\Delta x = 1$ мм; шаг спектральной перестройки $\Delta \lambda = 5$ нм.

На рисунке 1 приведен внешний вид LVF.



Рисунок 1 – Внешний вид фильтра спектрометра

Внешний вид спектрометра со снятым светонепроницаемым кожухом и отсоединенной ПЗС-камерой приведен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Внешний вид спектрометра

В спектрометре линейка LVF конструктивно соединена с зубчатой рейкой моторизованного привода сканирования фильтра, которое программно осуществляется через замедляющий редуктор от шагового двигателя.

Спектрометр включает следующие базовые узлы: приемную оптику (объектив), LVF, управляемый моторизованным приводом и осуществляющей перемещение фильтра с различной скоростью в продольном направлении (по координате), как в прямом, так и обратном направлениях, ПЗС-камеру.

Сканирование неподвижного изображения в предметной плоскости осуществляется путем последовательного дискретного смещения LVF по оси x для каждого кадра съемки на один шаг, равный геометрическому шагу дискретной перестройки $\Delta x = 1$ мм.

При относительно высокой скорости перемещения изображения в предметной плоскости, например, при съемке земной поверхности с БПЛА самолетного типа, требуется очень «быст-

рое сканирование, которое в большинстве случаев невозможно реализовать механическим способом. Кроме того сканер увеличивает вес спектрометра.

Реализация режима самосканирования за счет скорости полета БПЛА на местность связана достаточно жесткой зависимостью необходимой частоты кадров f_k ПЗС-камеры с путевой скоростью V и высотой полета h БПЛА.

Как и в предыдущем случае для каждого смещения изображения в плоскости изображения спектрометра на величину Δx регистрируется один кадр информации. Продольная ось x LVF должна совпадать с вектором скорости БПЛА. Для горизонтального полета линейный размер «полосы» местности ΔS в направлении полета, которая проецируется на один дискретный фильтр LVF шириной Δx , определяется соотношением:

$$\Delta S = \Delta x \beta, \quad (1)$$

где β – коэффициент увеличения оптической системы (ОС) спектрометра.

$$\beta \cong h/d, \quad (2)$$

где h – расстояние от предметной плоскости до ОС (линзы) спектрометра (высота полета БПЛА); d – расстояние от линзы до плоскости изображения в которой установлена ПЗС-матрица; $h \gg d$.

Требуемая частота кадров определяется соотношением:

$$f_k = V/\Delta S. \quad (3)$$

С учетом (1) и (2) соотношение (3) имеет вид:

$$f_k = \frac{dV}{\Delta x h}. \quad (4)$$

При проецировании изображения местности одновременно на все $n = 60$ фильтров линейки, за $(2n - 1)$ шаг, т. е. за 119 кадров каждая «полоса» ΔS исходного изображения последовательно проходит через все 60 дискретных фильтров LVF.

В результате последующей покадровой выборки полученных цифровых изображений и «склейки» полос изображений одного «цвета» получаем 60 спектрально отфильтрованных изображений на длинах волн $\lambda_1, \dots, \lambda_{60}$, соответственно.

Результаты тестирования спектрометра на калиброванных источниках оптического излучения показали, что спектральное разрешение прибора не хуже $\Delta \lambda_i = 10$ нмв диапазоне 300–700 нм.

Применение LVF позволило создать малогабаритный гиперспектрометр изображений с достаточно простой оптической схемой, не требующей сложной юстировки и калибровки. Прибор пригоден для работы в полевых условиях, в том числе и с мобильных платформ различного типа.

Литература

1. Аншу Миглани. Гиперспектральные космические снимки: Обзор. [Электронный ресурс]. https://studylib.ru/doc/689478/giperspectral_nue_kosmicheskie_snimki—obzor Датаобращен.: 03.08.2020.
2. Гулис И.М., Купреев А.Г. Спектральная фильтрация изображений посредством дисперсных систем // Приборы и методы измерений. 2016. – Т. 7. – № 3. – С. 262–270.
3. Мультиспектральная камера Parot Seguoia [Электронный ресурс]. <https://bespilotnic.org/catalog/payload/multi-cam/969/> (Датаобращен.: 03.10.2020).
4. Henrik Fabricius, Oliver Pust. Linear Variable Filters for Biomedical and Hiperspectral Imaging Applications // Conferece Paper, January 2014. DOI: 10.1364/BIOMED.2014.BS3A.42
5. K. Ajaay Kumar, Nitesh Thapa, Sajiorosti A. Kuria-kose. Advances in spacebornehyperspectral imaging systems // Current Science, 2015, vol. 108, no. 5. – P. 826–832.
6. Jayapala M., Lambrechts A., Tack N., Geelen B., Masschelein B. Monolithic integration of flexible spectral filters with CMOS image sensors at wafer level for low cost hyperspectral imaging. [Electronical Resource]. <http://www.imagesensors.org/Past%20Workscops/20et%20Workshop/2013%20Papers/07-02053jayapala.pdf>-2015.
7. Казанский Н.Л., Харитонов С.И., Хонина С.Н., Волоотовский С.Г., Стрелков Ю.С. Моделирование гиперспектрометра на спектральных фильтрах с линейно-изменяющимися параметрами // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 256–270.
8. Иванов В.И., Иванов Н.И., Лазарчик А.Н. Компьютерные программно – аппаратные комплексы для автоматизированной обработки изображений в различных областях спектра с высоким пространственным разрешением // Материалы X МНТК «Приборостроение – 2017». – Мн.: БНТУ, 2017. – С. 105–107.

УДК 67.05

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ КООРДИНАТНО-ШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА

Матвеев В.Ю., Черняк А.С., Исаев А.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Постановка задачи

В 80–90 годы XX века была произведена масштабная модернизация производства современным на тот момент оборудованием. На сегодняшний момент электронная часть этого оборудования устарела и выходит из строя, однако электромеханическая часть исправна и имеет достаточный ресурс работы.

Также следует отметить, что по нормативной документации срок службы электронных элементов ограничен. Кроме того, большую роль в точности выполняемых операций при ручном управлении оборудованием играет человеческий фактор, что обуславливает острую потребность в высококвалифицированных специалистах, профессиональные навыки и опыт которых позволяет им выполнять операции с высокой точностью в ручном режиме управления.

Таким образом, в настоящее время возникает потребность в переснащении оборудования на основе современной элементной базы и введение дополнительных режимов работы, в том числе автоматического.

Современное развитие цифровой электротехники позволяет разработать информационно-измерительную систему автоматического управления с минимальным внесением изменений в конструкцию оборудования, но при этом обеспечивающую большую точность и надежность его эксплуатационных характеристик.

Цель и задачи разработки

Целью данной разработки являлась модернизация системы управления приводом каретки

координатно-шлифовального станка серии 395 м, выпускаемый Ленинградским (Санкт-Петербургским) заводом прецизионного станкостроения с 1984 года.

Движущаяся часть данного станка (шлифовальный круг) перемещается с помощью двух двигателей постоянного тока, каждый из которых отвечает за движение каретки вдоль одной из осей (U, W) и которые управляются посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ), что и послужило основой для реализации системы автоматического управления.

Первоначальная система управления представляла собой массивный блок управления приводом для каждой из осей, а также компьютер, который отображал информацию о перемещении каретки.

При разработке устройства были решены следующие задачи:

– предусмотрена возможность переключения между автоматическим и ручным режимами управления;

– предусмотрена остановка двигателя при заедании червячного вала;

– значительно уменьшены габариты и количество электронных компонентов системы управления;

– точность измерений использовании данной системы составляет 1 мкм;

– в автоматическом режиме точность регулировки управления достигает 10 мкм.

Описание устройства

Структурная схема разрабатываемой системы представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Структурная схема устройства

После модернизации система управления представляет собой небольшой блок, состоящий из монтажной коробки, в которую помещены следующие функциональные блоки:

- две небольшие платы управления энкодерами положения, которые расположены на оси двигателей, и энкодерами управления, используемыми при ручном режиме работы; каждая из плат контролирует перемещение вдоль одной из осей (Блок управления осью U, Блок управления осью W на рис. 1);

- плата, которая представляет собой вычислительный блок, построенный на базе микроконтроллера STM32, от которой отходит шлейф управления электродвигателями посредством двух H-мостов, составленных из восьми силовых транзисторов;

- блок индикации, который представляет собой LCD-дисплей, на который выводится информация о положении каретки, установленных параметрах или текущем состоянии, а также светодиоды, отображающие состояние станка.

Алгоритм работы системы

В алгоритме работы системы можно выделить следующие основные действия:

НАЧАЛО

1. Включение питания;
2. Восстановление исходных параметров (ШИМ = 50 %);
3. Режим работы ручной?
Если ДА, переход к пункту 4;
4. Изменить положение энкодера управления на Δl ?
Если ДА, переход к пункту 5;
5. Вращение против часовой стрелки?
Если ДА, переход к пункту 7;
7. Установка ШИМ = $50 - \Delta n$ (Δn задается вручную);
9. Фиксирование положения;
10. Определение положения по ЭП;
11. Вывод информации о положении энкодера управления на экран;
КОНЕЦ;
Если в пункте 5 НЕТ, переходим к пункту 8;

8. Установка ШИМ = $50 + \Delta n$ (Δn задается вручную);

9. Фиксирование положения;

10. Определение положения по энкодеру положения;

11. Вывод информации на экран;

КОНЕЦ;

Если в пункте 4 НЕТ, переход к пункту 6;

6. Установка ШИМ = 50 %;

КОНЕЦ;

Если в пункте 3 НЕТ, переход к пункту 12;

12. Перейти в режим задания параметров?

Если ДА, переход к пункту 13;

13. Изменить положение энкодера управления?

Если ДА, переход к пункту 14;

14. Установка положения энкодера управления;

15. Вывод установленного параметра на экран;

КОНЕЦ;

Если в пункте 13 НЕТ, переход к пункту 15;

15. Вывод установленного параметра на экран;

КОНЕЦ;

Если в пункте 12 НЕТ, переход к пункту 16;

16. Выполнить пуск в автоматическом режиме?

Если НЕТ, переход к пункту 17;

17. Вывод текущего положения на экран;

КОНЕЦ;

Если в пункте 16 ДА, переход к пункту 18;

18. Установка задержки;

19. Установленный предел достигнут?

Если ДА, переход к пункту 20;

20. Завершение прохода;

21. Сброс в состояние ПУСК;

КОНЕЦ;

Если в пункте 19 НЕТ, переход к пункту 22;

22. Сдвиг на 10 мкм;

23. Значение физического предела достигнуто?

Если ДА, переход к пункту 20;

20. Завершение прохода;

21. Сброс в состояние ПУСК (ШИМ = 50 %);

КОНЕЦ;

Если в пункте 23 НЕТ, переход к пункту 24;

24. Выполнена ручная установка?

Если НЕТ, переход к пункту 25;

25. Вывод текущего состояния на экран;

Переход к пункту 18;

Если в пункте 24 ДА, переход к пункту 20;

20. Завершение прохода;

21. Сброс в состояние ПУСК;

КОНЕЦ.

Конкурентные преимущества

Разработанная система управления имеет следующие преимущества:

- Возможность обслуживания большего количества штатного оборудования и механиз-

мов одним оператором при использовании автоматического режима управления;

– Современный подход и элементная база позволяют осуществлять коррекцию параметров под конкретные требования;

– Возможность управления станком в ручном или автоматическом режиме по желанию оператора;

– Данная система является адаптивной, существует возможность модификации системы для модернизации систем позиционирования на различных станках;

– Возможность эксплуатации станка операторами с различной квалификацией: как операторами с владениями навыками работы со станками с числовым программным управлением (ЧПУ), так и высококвалифицированными специалистами, профессиональные навыки и опыт которых позволяет им выполнять операции с высокой точностью в ручном режиме управления;

– Невысокая стоимость комплектующих элементов.

Текущая стадия проекта

Опытная конструкторско-технологическая работа с внедрением.

Потенциальные потребители

Металлообрабатывающие предприятия: организация оснастки металлообрабатывающих станков средствами автоматического управления.

Работа была выполнена на базе студенческой научно-исследовательской лаборатории полупроводниковой техники, организованной на кафедре «Информационно-измерительная техника и технологии» приборостроительного факультета.

Литература

1. Альперович Т.А., Константинов К.Н., Шапиро А.Я. Наладка и эксплуатация шлифовальных станков Учебник. – М.: Высшая школа, 1989. – 240 с.: ил.

2. Ашкиназий Я.М. Бесцентровые круглошлифовальные станки. Конструкции, обработка и правка М.: Машиностроение, 2003. – 352 с.

3. Карабчиевский Л.П., Воскресенский Л.А. Автоматизация шлифовальных станков М.: Машиностроение, 1982. – 95 с.: ил.

УДК 621.396

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

Шейников А.А.¹, Исаев А.В.², Зеленко В.В.², Суходолов Ю.В.²

¹Военная академия Республики Беларусь

Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Информацию о значениях физических величин внутри измерительной системы переносят измерительные сигналы. Эта информация может содержаться в совокупности некоторых мгновенных значений основного параметра сигнала, в статистических параметрах, если сигнал является случайным и т.д. В импульсных измерительных системах наиболее часто применяются частотные параметры сигнала. При этом для синтеза и анализа измерительных сигналов используется спектральный метод. Из теории преобразования Фурье известно, что отображение сигнала в частотной области верно для стационарных сигналов. Тем не менее, на практике спектральный анализ применяется на конечном интервале времени [1] и связан с квазистационарными измерительными сигналами [2]. Поэтому, нужна разработка математического аппарата, обеспечивающего однообразное описание спектров периодических и квазипериодических сигналов. Целесообразный путь достижения этой цели – анализ процесса формирования дискретного спектра из спектральной плотности при периодизации сигнала. При этом имеется

несколько подходов к представлению этого процесса. Так, из теоремы Котельникова [3] следует, что спектр непериодического сигнала можно найти, умножая спектр периодического сигнала на прямоугольную функцию в частотной области. Но практическая реализация точного преобразования спектральной плотности в дискретный спектр с помощью ряда Котельникова неосуществима. Дело в том, что сигнал с ограниченным спектром – это сигнал, продолжающийся бесконечно долго. При дискретизации этого сигнала будет получено бесконечное число отсчетов. Для восстановления исходного непрерывного сигнала, а, следовательно, и для получения дискретного спектра этого сигнала, надо учесть все отсчеты сигнала, что невозможно ввиду неограниченной длительности последнего. Второй подход к решению задачи состоит в получении периодической последовательности импульсов, представляющей собой сумму одиночных сигналов, равно задержанных на время t_3 относительно друг друга [4]. К примеру можно рассмотреть сигнал последовательности радиоимпульсов (рисунок 1).

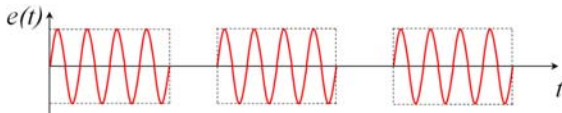


Рисунок 1 – Периодическая последовательность радиоимпульсов

Пользуясь теоремой о смещении, спектральную плотность сигнала суммы из двух радиоимпульсов $S_2(j\omega)$, задержанных относительно друг друга на время t_3 , можно представить в виде произведения спектральной плотности исходного одиночного радиоимпульса $S_1(j\omega)$ и коэффициента, учитывающего задержку между импульсами $[1 + e^{j\omega t_3}]$. Следовательно для спектральной плотности сигнала суммы из трех радиоимпульсов верно выражение:

$$S_m(j\omega) = S_1(j\omega)[1 + e^{j\omega t_3} + e^{j\omega 2t_3}], \quad (1)$$

а для спектральной плотности сигнала суммы из m радиоимпульсов:

$$S_m(j\omega) = S_1(j\omega)[1 + e^{j\omega t_3} + \dots + e^{j\omega(K-1)t_3}]. \quad (2)$$

Следует учитывать, что рассмотрение реального сигнала как периодического приведет к ненормируемой погрешности из-за конечности длительности измерительных процессов. Соответственно целесообразным является определение влияния погрешности формирования дискретного спектра в зависимости от числа повторений N при периодизации. С ростом числа импульсов во время периодизации в спектральной плотности сигнала образуется все больше нулей [5]. Так как каждый ноль спектральной плотности находится на определенной частоте, он является спектральной составляющей дискретного спектра, а сам спектр квазипериодического сигнала можно считать комбинированным, т. е. состоящим из участков спектральной плотности, разбитых спектральными составляющими с нулевой амплитудой. При увеличении количества нулей уменьшается расстояние между ними и растет спектральная плотность в области частот, кратных частоте периодизации, т.е. формируются гармоники будущего дискретного спектра. Другими словами, при периодизации происходит процесс преобразования спектральной плотности в дискретный спектр (рисунок 2).

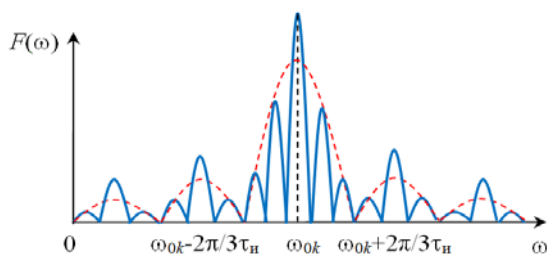


Рисунок 2 – Изменение формы спектральной плотности сигнала последовательности радиоимпульсов при увеличении их количества

Поэтому появляется необходимость введения классификационного критерия для определения периодических процессов. Таким критерием может быть длительность интервала времени, достаточного для установления между частотными компонентами соотношений, характерных для периодического процесса, с заданной точностью. С целью обоснования классификационного критерия надо рассмотреть влияние на спектр возмущения в виде скачкообразного изменения параметра импульсного процесса в момент времени t_0 , считая, что до этого момента времени спектр был дискретным. В этом случае, в силу линейности преобразования Фурье [5], текущий спектр последовательности импульсов, подвергнутой изменению параметра (3), представляет собой сумму дискретного спектра невозмущенной последовательности импульсов и спектра возмущающего сигнала [6]:

$$F(\omega, \varepsilon) = F_0(\omega) \frac{\sin\left(\frac{N\omega T}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\omega T}{2}\right)} e^{-\frac{j(N-1)\omega T}{2}} + F_0[\omega, (\varepsilon - NT)]e^{-j\omega NT}, \quad (3)$$

где ω – частота следования импульсов в пачке, T – период следования пачек импульсов; N – количество импульсов в пачке; ε – любой конечный ряд.

Из этого следует, что скорость формирования всех частотных компонент (4) одинакова и опережается функцией:

$$\gamma(N) = \left| \frac{\sin\left(\frac{N\omega T}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\omega T}{2}\right)} \right|. \quad (4)$$

В связи с тем, что амплитуда и ширина основного лепестка этой функции однозначно определяется числом импульсов N в сигнале с измененным значением возмущенного параметра, для оценки завершенности процесса формирования гармоник спектра должно быть введено такое значение $N = N_0$, которое было бы связано с различными условиями фиксации параметров частотных компонентов.

Очевидно, что в случае фиксации изменений n -ной гармоники исходного сигнала из-за вариации контролируемого параметра следует соотносить ширину лепестка основного максимума кривой $\left| \frac{\sin\left(\frac{N\omega T}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\omega T}{2}\right)} \right| = \varepsilon(\omega)$ с шириной резонансной кривой избирательной системы, применяемой для регистрации, на установленном уровне. Ориентируясь на избирательную систему типа «колебательный контур» [7] с шириной полосы пропускания $2\Delta\omega = \frac{n\omega}{Q} = \frac{2\pi n}{QT}$ (Q – добротность) получено соотношение (5) для определения количества импульсов N_0 , при котором ширина

основного лепестка анализируемой кривой на уровне 0,707 в β раз меньше ширины резонансной кривой на том же уровне:

$$N_0 = \frac{\beta Q}{\pi} \arcsin \left(0,707 N_0 \sin \left(\frac{n\pi}{\beta Q} \right) \right). \quad (5)$$

Обоснованное значение β может быть выбрано с учетом связи времени переходного процесса с относительной шириной полосы пропускания (или добротности) избирательной системы, применяемой для регистрации. С учетом того, что время переходного процесса $t_{\text{перех}} = \frac{5QT}{\pi}$, можно получить:

$$0,707 N_0 = \frac{\sin \left(\frac{5N_0 T}{\beta t_{\text{перех}}} \right)}{\sin \left(\frac{5T}{\beta t_{\text{перех}}} \right)}. \quad (6)$$

Это выражение позволяет сравнить скорость формирования гармонических составляющих спектра сигнала со скоростью переходного процесса и найти условия, удовлетворяющие требованиям решаемой технической задачи.

Тем не менее полный ответ на вопрос о необходимом количестве импульсов N_0 для установления процесса формирования частотных компонентов после возмущения может быть дан лишь на основе определения выходного напряжения избирательной системы с использованием обратного преобразования Фурье. Указание отсчетного уровня данного напряжения, соответствующего окончанию переходного процесса, позволяет с заданной точностью определить нужное число периодов регистрируемого процесса.

Принципиальная возможность вычисления N_0 позволяет более определенно классифицировать детерминированные процессы по отношению к строгому понятию периодичности. Поэтому предлагается считать, что детерминированные процессы могут с заданной погрешностью считаться периодическими, если количество реализаций процесса с измененными значениями параметров $N \geq N_0$.

Результаты анализа результатов проведенного исследования актуализируют вопрос о более дифференцированном разделении процессов внутри категории периодических. Необходимость такого разделения определяется практикой измерительного преобразования.

Литература

1. Глинченко А.С. Цифровая обработка сигналов: в 2 ч. Ч. 1 / А.С. Глинченко. – Красноярск: Изд-во КГТУ, 2001. – 199 с.
2. Клаассен К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике / К.Б. Клаассен. – М: Постмаркет, 2000. – 352 с.
3. Гутников В.С. Фильтрация измерительных сигналов / В.С. Гутников. Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 192 с.
4. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы / И.С. Гоноровский. – М.: Дрофа, 2006. – 719 с.
5. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы / С.И. Баскаков. – М.: Высш. шк., 2000. – 462 с.
6. Панфилов В.А. Электрические измерения / В.А. Панфилов. – М.: Академия, 2008. – 288 с.
7. Ревин В.Т. Преобразование и преобразователи измерительной информации: учеб. пособие: в 5 ч. – Ч.1 / В.Т. Ревин. – Минск: БГУИР, 2002. – 70 с.

УДК 621.313

AUTOMATIC NAIL TRANSFER TO THE IMM ZONE SYSTEM

Kandratsyeva N.K., Pronchack A.N., Isayev A.V.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Injection molding machine (IMM) also known as an injection press, is a machine used for the thermoplastics parts manufacturing by injection molding. Currently, more than a third of the world's single-piece products from polymer materials are produced using injection molding machines. The injection molding technology is ideally suited to the mass production of complex shapes, an important requirement for which is exact size matching [1].

The cycle time in the casting process varies widely – thin-walled products can be produced in a few seconds, castings weighing hundreds of kilograms can be produced in minutes.

Plastics remain one of the most popular materials used in almost any area of technology and med-

icine. This is one of the most common methods. The main reason for its prevalence is the injection molding machine low cost with the ability to obtain any geometric shape products. Metal, wood or glass are significantly more expensive, so they can compete with polymer materials only in narrow niches. By using IMM you are allowed to automate the manufacturing process as much as possible, to obtain high-precision products at a low cost.

This process automation takes place, since injection molding technology has many advantages over other methods. Let's list the most significant of them:

- minimum waste;
- high performance;
- accelerated technological process;

– the ability to make polymer products with any shape and size.

The use of manual labor when using injection molding machines is minimal, all operations are controlled by automation, controlling all casting processes and the amount of material.

Products from polymer raw materials are widespread due to their low cost, high manufacturability of production, and the possibility of recycling.

For many types of manufacturing, it will be beneficial to organize such process on their own, and not buy them on the side.

There is nothing complicated to organize a line for the thermoplastic products manufacturing.

The inner mold contours precisely follow the future product shape, therefore, the complete filling of the tooling with polymer means obtaining geometrically accurate parts.

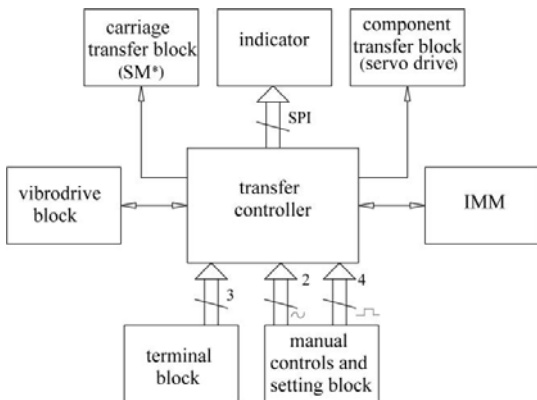
For the manufacturing owner automatic process is the most important, when all operations are controlled by electronics. The IMM elements are usually driven by a pneumatic drive, which is powered by an electric motor.

To avoid destroying the nails head, we cover them tightly with plastic. This way the nail will retain its aesthetic and will last longer as a construction component.

An automation of the transfer nails to the IMM zone process, this will significantly increase the number of processed nails per unit of time. Also we will receive a quality increase, since the transfer process will be fully and completely operated by the controller.

Block-schematic diagram is shown on the Figure 1. It contains the following blocks:

- transfer controller;
- carriage transfer block;
- indicator;
- component transfer block;
- vibrodrive block;
- IMM;
- terminal block;
- manual controls and setting block.



*SM - stepper motor

Figure 1 – Block-schematic diagram

Transfer controller is responsible for generating an appropriate signals at appropriate times. It analyzes button positions, sets transfer and mounting rate, changes system states and modes.

Carriage transfer block is a stepper motor unit. It's responsible for keeping each nail fixed at appropriate place and transferring itself to IMM.

Components transfer block inserts each nail to appropriate place.

Indicator shows system modes.

Terminal block is a device that opens a circuit in a system when moving parts reach their end position.

Manual controls and setting block are used for transfer and mounting rate input.

IMM covers each nail tightly with plastic.

General algorithm is shown on the Figure 2. It contains steps to reach operating mode.

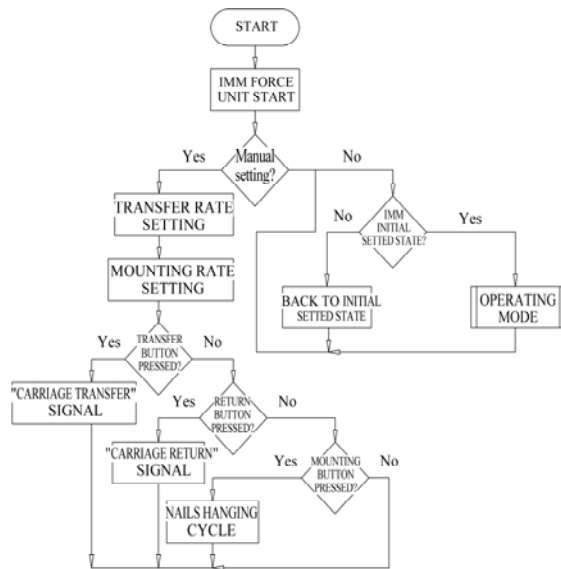


Figure 2 – General algorithm

Originally we launch IMM, we launch IMM force unit too. The controller checks for setting mode occurrence, is it manual. If it's happened, as result we receive transfer rate setting and mounting rate setting polling. These steps we setting the system.

After the controller analyze if the transfer button is pressed. Pressed – a «carriage transfer» signal is generated by the controller. After the system goes for initial state check. Not pressed - the controller analyzes if the carriage return button is pressed. Pressed – a «carriage return» signal is generated. Not pressed – the controller checks for mounting button position. Pressed - the sustem goes to nails hanging cycle. Else – all goes back to setting.

The system is also checking itself for being in the initial setted state before the transfer process. When it's a step checks IMM initial setted state, in positive case, all goes to operating mode. Else the system is getting to initial setted state.

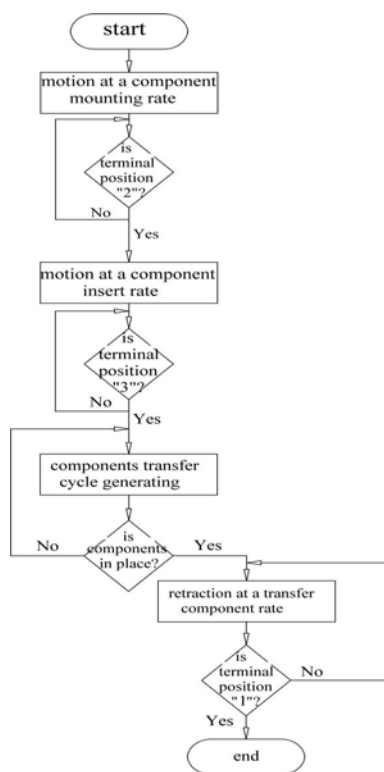


Figure 3 – Operating mode execution algorithm

The operating mode includes transfer nails into the IMM zone according settings.

After the operating mode the controller checks for the system being in the initial setted state to continue performing in that mode.

Operating mode execution algorithm is shown on the Figure 3. Unlike general algorithm, this one demonstrates operating mode steps only.

The controller tells everything to go at a component mounting rate before the terminal switches to position «2». This is for rate matching. After that, the motion takes a component insert rate value.

If the terminal is switched to «3» position, the controller generates a component transfer cycle. Which means components transfer to the IMM zone.

All components have to be placed into right appropriate places at the zone. When everything is correct, the controller tells the system to start retraction at a transfer component rate. It continues until the terminal position is «1». It means that every component is in the IMM zone now.

References

1. Douglas M. Plastic Injection Molding: Manufacturing Process Fundamentals / M. Douglas. – SME, 1996.

УДК 621.313

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРА НАМАГНИЧИВАЮЩЕГО ТОКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПРИ ДЕФЕКТАХ В ОБМОТКАХ

Исаев А.В., Зеленко В.В., Сизиков С.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Одной из наиболее важных проблем современной электротехники является своевременное определение и диагностика неисправностей в электрических машинах – трансформаторах, двигателях постоянного и переменного тока. Одной из основных неисправностей, на долю которой выпадает до 90 % от всех – это межвитковые замыкания. Природа этих неисправностей может быть различной, но итог, как правило, один – выход из строя как самой электрической машины, так и всей системы, частью которой она является. По этому, задачей современной электротехники, является своевременная диагностика электрических машин, в том числе и трансформаторов, и выявление образующих дефектов на максимально ранних стадиях. И одним из таких подходов является фиксирование активного сопротивления в обмотках при работе трансформатора в режиме холостого хода.

Для проведения испытаний была сформирована электрическая схема измерительного стенда (рисунок 1) с возможностью как отображения получаемых характеристик, так и снятия параметров каждой измеряемой дискретной точки с возмож-

ностью дальнейшей обработки полученных результатов с помощью компьютерных технологий.

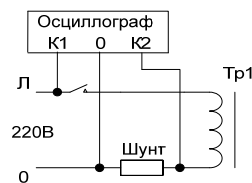


Рисунок 1 – Электрическая схема стенда имитации уменьшения межвитковых сопротивлений

Результаты измерений представлены на рисунках 2 и 3. Где первый канал отображает прикладываемое синусоидальное напряжение, а на втором канале снимается кривая тока первичной обмотки.

Представленные характеристики показывают, что при отсутствии межвитковых замыканий действующее значение первой гармоники гораздо меньше действующего значения высших гармоник. А в случае появления межвитковых замыканий резко увеличивается действующее значение первой при неизменном действующем значении высших гармоник.

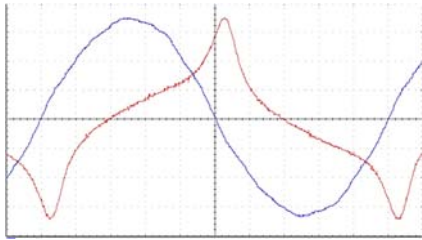


Рисунок 2 – Кривая режима холостого хода

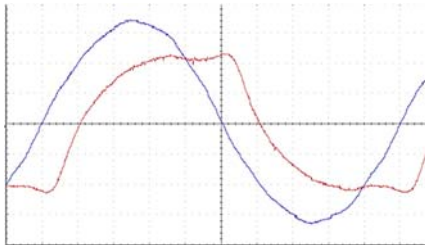


Рисунок 3 – Кривая тока первичной обмотки при витковом замыкании через сопротивление 10 Ом

Согласно полученной характеристике трансформатора, работающего на холостом ходу, оценим значения начальных фаз высших гармоник составляющих намагничивающего тока трансформатора. Анализ кривой (рисунок 4) показывает, что в ее форме можно выделить несколько характерных точек:

- точка 1 – значение кривой тока в момент времени $t = t_0$;
- точка 2 – значение кривой тока в момент времени $t = t_m$;
- точка 3 – значение кривой тока в момент времени $t = 0$.

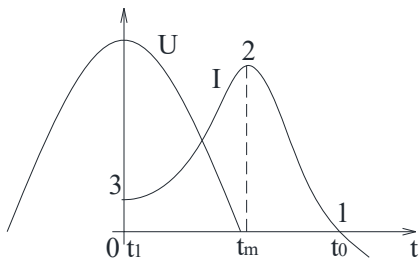


Рисунок 4 – Анализируемая кривая намагничивающего тока трансформатора

Согласно представлению Фурье в тригонометрической форме где кривая может быть описана в виде:

$$\sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \sin(n\omega t_0 + \varphi_n) = 0$$

Представленная характеристика может быть описана системой:

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \sin(n\omega t_0 + \varphi_n) = 0 \\ \sum_{n=1}^{\infty} n I_{mn} \cos(n\omega t_m + \varphi_n) = 0 \\ \sum_{n=1}^{\infty} n^2 I_{mn} \sin(\varphi_n) = 0 \end{cases}$$

Решение представленной системы имеет следующий вид:

$$f_i(k) = \frac{\sin(f_{i1}) (2 \sin(k\omega_m t_0) \cos(\omega_m t_m + f_{i1}) - k \cos(k\omega_m t_m) \sin(\omega_m t_0 + f_{i1}))}{k^2 \cos(\omega_m t_m + f_{i1}) \sin(\omega_m t_0 + f_{i1}) - k \sin(f_{i1}) \sin(\omega_m t_0 + f_{i1}) - 2 \sin(f_{i1}) \cos(\omega_m t_m + f_{i1})} + 3,1428 \frac{1 + (-1)^{\frac{k+1}{2}}}{2}$$

Учитывая, что параметры первой гармоники (амплитуду и сдвиг фаз) с помощью инструментальных средств можно определить с достаточно большой точностью, параметры остальных можно получить, решив полученное итоговое уравнение. Что и было подтверждено посредством программного обеспечения Mathcad (рисунок 5).

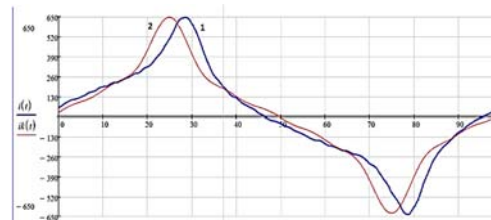


Рисунок 5 – Результаты исследования зависимости намагничивающего тока трансформатора, работающего на холостом ходу:

1 – характеристика, полученная на измерительном приборе; 2 – характеристика, рассчитанная посредством программного обеспечения Mathcad (7 гармоник)

Литература

1. Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин. Учеб для вузов по спец. «Электромеханика». М.: Высш. шк., 1990. – 255 с.:ил.
2. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин / Под ред. Р.Б. Уманцева. – 9-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 336 с.
3. Патент на изобретение №16628. Способ контроля витковой изоляции обмотки якоря электрической машины. Выданный национальным центром интеллектуальной собственности в соответствии с Законом Республики Беларусь. Заявка №20101783 от 2010.12.10
4. Патент на изобретение №20042. Способ контроля фазных обмоток трехфазной электрической машины. Выданный национальным центром интеллектуальной собственности в соответствии с Законом Республики Беларусь. Заявка №20130998 от 19.08.2013.

УДК 621.382

СОПОСТАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ И АНАЛОГОВЫХ МЕТОДОВ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Тявловский А.К.¹, Жарин А.Л.¹, Шаронов Г.В.², Мухуров Н.И.³, Воробей Р.И.¹, Гусев О.К.¹, Свистун А.И.¹, Микитевич В.А.¹

¹Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

²Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ

Минск, Республика Беларусь

³ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Минск, Республика Беларусь

Развитие нанотехнологий, связанное, в частности, с созданием многофункциональных наноструктурированных покрытий, требует разработки соответствующих методов контроля для анализа качества технологических процессов. Значительное распространение в настоящее время получили алмазоподобные наноструктурированные покрытия из пористого анодного оксида алюминия (ПАОА). К существенным особенностям таких покрытий, с точки зрения их исследования и контроля, следует отнести высокую однородность, малую толщину покрытия, резкое отличие электрофизических и иных свойств покрытия от свойств подложки, на которой оно сформировано, малые размеры подлежащих выявлению дефектов. При этом характерные размеры изделий с наноструктурированными покрытиями могут достигать десятков сантиметров, что приводит к требованию выполнения контроля наноразмерных дефектов на макроскопических масштабах.

Отсюда следует, что метод контроля наноструктурированных покрытий из ПАОА должен быть поверхностно-чувствительным, обладать высокой обнаружительной способностью, обеспечивать контроль на достаточной большой (макроскопической) площади поверхности и являться неразрушающим. Как было показано ранее [1], данным требованиям удовлетворяют методы зондовой электрометрии, основанные на регистрации пространственного распределения относительных значений работы выхода электрона с поверхности с помощью бесконтактного сканирующего зонда Кельвина. Результатами контроля с использованием данных методов являются визуализированная карта распределения относительных значений работы выхода электрона (РВЭ) по контролируемой поверхности и гистограмма распределения этих значений. Данный метод контроля не является абсолютным, поскольку выходной сигнал зонда Кельвина определяется разностью значений РВЭ чувствительного элемента зонда и контролируемого участка поверхности. Первая из этих величин не может быть определена независимым методом, однако может рассматриваться как константа преобра-

зователя, что позволяет сопоставлять результаты, полученные с помощью одного и того же преобразователя в одних и тех же условиях, например, путем анализа полуширины гистограммы распределения значений РВЭ, однако исключает непосредственную интерпретацию полученных значений – в частности, не имеет диагностического значения и не может быть использовано как характеристика поверхности математическое ожидание относительных значений РВЭ.

Для сокращения времени контроля макроскопических поверхностей с сохранением высокого пространственного разрешения была предложена и реализована конструкция цифрового электрометрического зонда Кельвина [2]. Особенностью цифрового зонда является определение значений измеряемой величины косвенным методом на основе вычислений, выполняемых в автоматическом режиме, что позволяет выполнять измерения в режиме большого сигнала, исключив из схемы инерционную цепь обратной связи.

На рисунке 1 приведены результаты исследования пространственного распределения относительных значений РВЭ алюминиевой пластины с покрытием из ПАОА с использованием цифрового зонда. Исследуемый образец представлял собой круглую пластину диаметром 100 мм, покрытие в районе базового среза пластины частично отсутствовало.

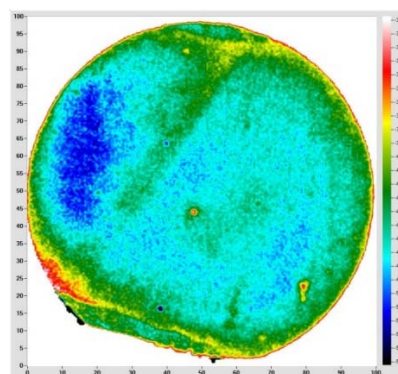


Рисунок 1 – Результаты исследования пространственного распределения РВЭ поверхности покрытия из ПАОА на алюминии с использованием цифрового зонда Кельвина

Пространственное разрешение полученного визуализированного изображения составило 0,5 мм. Условные цвета точек (пикселей) изображения соответствуют зарегистрированным значениям контактной разности потенциалов (КРП), имеющим обратный по отношению к РВЭ знак. Таким образом, участки с наибольшими значениями КРП соответствуют наименьшим значениям РВЭ и наоборот. Шаг дискретизации значений КРП составлял 2 мВ. На изображении четко выделяются точечные дефекты, характеризующиеся резко повышенными значениями КРП и, соответственно, пониженными значениями РВЭ. Помимо этого, на изображении прослеживается повышенная неоднородность электрофизических свойств поверхности ПАОА, особенно в районе базового среза пластины (нижняя часть изображения), где покрытие нарушено. Также обращает на себя внимание протяженная область в виде полосы с пониженными значениями РВЭ, пересекающей пластину по хорде, при этом сами значения отличаются от РВЭ поверхности в целом на меньшую величину, чем РВЭ точечных дефектов. Можно предположить, что в данном случае имеет место структурный дефект покрытия, тогда как точечные дефекты соответствуют поверхностным загрязнениям.

Дополнительно были выполнены исследования пространственного распределения РВЭ того же образца с использованием аналогового электрометрического зонда Кельвина, реализующего традиционный компенсационный метод измерений. Пространственное разрешение полученного визуализированного изображения составило 1,2 мм. При таких настройках суммарное время выполнения исследований, вследствие большой постоянной времени установления сигнала в компенсационном режиме, превысило 3 ч, что исключало возможности уменьшения шага сканирования и улучшения пространственного разрешения. Результаты исследования показаны на рисунке 2.

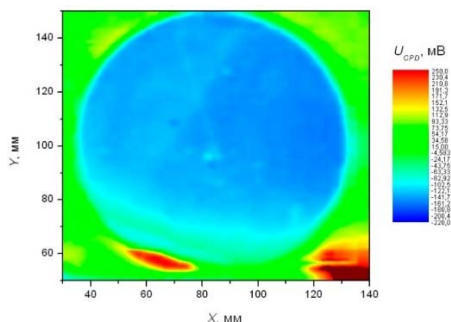


Рисунок 2 – Визуализация пространственного распределения РВЭ поверхности того же образца, выполненная с использованием аналогового зонда

Можно видеть, что полученные с помощью цифрового и аналогового зондов визуализированные изображения пространственного распре-

деления относительных значений РВЭ качественно соответствуют друг другу, однако различаются как по степени детализации, так и по зарегистрированным количественным значениям КРП. Последнее объясняется различием значений РВЭ чувствительных элементов использованных зондов и не связано с методом обработки сигнала.

Ряд мелких дефектов поверхности ПАОА, выявленных на первом визуализированном изображении (рисунок 1), не проявляется на втором (рисунок 2), что можно объяснить более низкой разрешающей способностью сканирования при использовании компенсационного аналогового метода измерений. В то же время, на втором изображении наблюдается дополнительный элемент в виде линии (дефекта), идущей вверх и влево от центра образца. В связи с этим необходимо отметить, что после получения приведенного на рисунке 1 визуализированного изображения были выполнены исследования обратной стороны образца, в процессе которых он располагался лицевой стороной на держателе – вакуумной присоске, причём расположение указанного элемента на изображении рисунка 2 соответствует положению желоба на поверхности держателя. Таким образом, данную особенность визуализированного изображения следует атрибутировать на счет манипуляций с образцом в процессе измерений. В подтверждение можно привести визуализированное изображение РВЭ тыльной стороны того же образца, полученное с использованием цифрового зонда (рисунок 3). На изображении хорошо видны следы микродеформаций поверхностного слоя в районе четырех круглых углублений в поверхности держателя, предназначенных для размещения крепежных винтов.

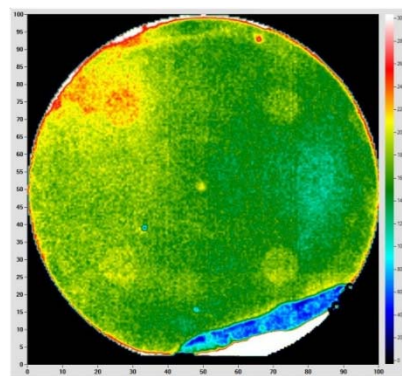


Рисунок 3 – Визуализация пространственного распределения РВЭ тыльной поверхности образца с покрытием из ПАОА

Сопоставление полученных результатов показало, что цифровой метод обработки сигнала обеспечивает более высокое разрешение по значениям РВЭ при более высокой детализации визуализированного изображения по сравнению с аналоговым компенсационным методом измере-

ний при прочих равных условиях и демонстрирует явное преимущество над последним по всем показателям.

Литература

1. Тявловский, А.К. Анализ дефектов поверхности исходных подложек алюминия и его сплавов методом сканирующего зонда Кельвина / А.К. Тявлов-

ский, А.Л. Жарин, О.К. Гусев, Р.И. Воробей, Н.И. Мухуров, Г.В. Шаронов, К.В. Пантелеев // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 61–72. DOI:10.21122/2220-9506-2017-8-1-61-72

2. Пантелеев, К.В. Цифровой измеритель контактной разности потенциалов / К.В. Пантелеев, А.И. Свистун, А.К. Тявловский, А.Л. Жарин // Приборы и методы измерений. 2016. – Т. 7, № 2. – С. 136–144.

УДК 621.391

ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ СТЕГАНОГРАФИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗОБРАЖЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ КОНТЕЙНЕРА

Ковынёв Н.В.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Москва, Российская Федерация*

Использование стеганографии с контейнером в виде изображения относится к процессам сокрытия данных в файлах цифровых изображений различных типов.

Цифровое изображение можно представить в виде конечного набора цифровых значений, которые называются пикселями. Пиксель – наименьший отдельный неделимый элемент изображения, который содержит значения, представляющие яркость определенного цвета в конкретной точке. Исходя из данных определений, можно представить изображение в виде матрицы или двумерного массива, содержащих фиксированное количество строк и столбцов.

Рассматривая термин «цифровое изображение», используют понятие «растровая графика». Растровая графика представляет структуру данных с точечной матрицей, которая предстает в виде сетки пикселей, которая может храниться в файлах изображений при различных форматах.

Исходя из определения термина «пиксель», можно утверждать, что каждый пиксель – образец исходного изображения. Отсюда следует вывод: чем больше представлено образцов, тем лучше и точнее представляется оригинальное изображение. Каждый пиксель имеет определенную интенсивность, которая переменна. Обычно цвет представляют тремя или четырьмя интенсивностями компонентов в системах цветовой визуализации, для систем из трех компонентов чаще всего используются следующие цвета: красный, зеленый, синий. Для систем из четырёх компонентов чаще всего используют: черный, желтый, голубой, пурпурный.

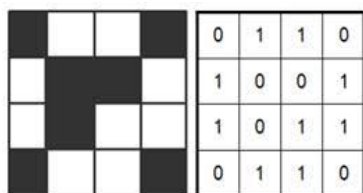


Рисунок 1 – Пример кодирования цветов пикселя

Каждый пиксель имеет определенные значения, которые можно представить в виде двоичного кода, работая с которым можно наблюдать более значимые и менее значимые биты пикселей изображения.



Рисунок 2 – Пример представления числа в виде массива бит

Изменение наиболее значимого бита изображения оказывает огромное влияние на конечное значение изображения. Например, если изменить значение наиболее значимого бита с 1 на 0 (в двоичном виде замена будет выглядеть следующим образом: с 11111111 на 01111111), то десятичное значение данного бита изменится с 255 на 127. Обратная данной замене – замена наименее значимого бита, которая оказывает меньшее влияние на конечное значение изображения. Например, если значение наименее значимого бита изменить с 1 на 0 (в двоичном виде замена будет выглядеть следующим образом: с 11111111 на 11111110), то десятичное значение данного бита изменится с 255 на 254. Исходя из данных замен видно, что наименее значимый бит меняется только на 1, что меньше 1 %, так как полный диапазон состоит из 256.

Исходя из данных, использованных при заменах пикселей, можно сделать вывод, что каждый пиксель имеет три значения: красный, зеленый и синий (RGB: Red, Green, Blue). Каждое значение цветов (RGB) восьмиразрядное, может хранить восемь двоичных значений. Соответственно, если изменить наименее значимые биты, то можно получить незначительное влияние на конечное изображение. Данное незначительное влияние –

стеганографический ключ, скрывающий информацию внутри изображения. Для наиболее успешного стеганографического преобразования изображения нужно изменить наименее значимые биты исходного изображения, включив в них наиболее значимые биты из другого (секретного или передаваемого) изображения. Данные преобразования характерны для метода младшего значащего бита или LSB (Least Significant Bit). Данный метод наиболее распространен в стеганографии с использованием изображений.

Остальные стеганографические алгоритмы, которые используют изображение в качестве контейнера, используют в своих реализациях воздействие на яркость в каких-либо определенных участках изображения, которые незначительно влияют на исходное изображение (контейнер). Стоит отметить, что изменения яркости контейнера не нарушают скрытность передачи стеганографического сообщения.

Стеганографические контейнеры в виде изображений на данный момент очень сильно распространены, их применяют в сферах защиты авторских прав, сферах идентификации и подлинности документов, сокрытия передаваемых сообщений, защита от контрафактного использования товаров и услуг. Также стеганографию в изображениях применяют и авторы вредоносного или шпионского программного обеспечения. Использование данного метода актуально среди злоумышленников, так как антивирусные средства и средства защиты мало что могут сделать с заполненными контейнерами, потому что их трудно обнаружить, так как они выглядят как обычные графические файлы.

Рассмотрим положительные и отрицательные стороны применения данных методов стеганографии с изображениями. К положительным сторонам можно отнести следующее:

- неизменность размера файла контейнера;
- замены битов в канале трудно заметить визуально;
- возможность варьирования пропускной способностью, при помощи изменения количества заменяемых бит;
- при использовании изображений с большим разрешением, можно получить контейнер большой емкости;
- методы не требуют дополнительной предобработки (в частности шифрования) исходного изображения;
- возможность скрытой передачи большого объема информации;
- многие методы просты в использовании и легки в реализации (например, методы, связанные с особенностями форматов файлов).

Несмотря на большое количество достоинств данных методов, стеганография в изображениях имеет ряд недостатков, такие как:

- слабая устойчивость к статистическому стегоанализу;
- высокая вероятность нарушения порядка бит в цветовых векторах изображения, что приведет к разрушению стегоконтейнера;
- слабая устойчивость к перекодировкам изображения, ввиду чего скрытое сообщение может быть утеряно (пересылка по электронной почте или мессенджером);
- легкое детектирование наличия стегосообщения;
- низкая защищенность;
- неустойчивость методов к обработкам файла-контейнера;
- сообщение трудно восстановить, если изображение подвергается атаке (например, сдвиг или поворот).

Рассмотрев все достоинства и недостатки стеганографии в изображениях можно сделать вывод, что использование графических изображений в виде контейнеров для стеганографической передачи информации имеет широкое распространение как при передаче информации по открытым каналам, так и для ведения вредоносной или шпионской деятельности. Также стеганография в изображениях используется для подтверждения авторства, проверки подлинности документов. Исходя из преимуществ и недостатков каждого алгоритма сокрытия, можно выбрать для использования подходящий алгоритм.

В заключении можно сказать, что при передаче информации, скрываемой в файле изображения, необходимо отдавать предпочтение методам кодирования и расширения спектра сигнала. Кроме того, само сообщение необходимо зашифровать стойким криптоалгоритмом, чтобы при перехвате сообщения, было сложнее получить передаваемую информацию. В тоже время графические изображения вызывают много подозрений при передаче их по открытым каналам, ввиду чего скрытая передача информации стеганографическими методами переходит к текстовым файлам, так как на данный момент текстовые файлы вызывают меньше подозрений при передаче по открытым каналам.

Литература

1. Коробейников А.Г., Кувшинов С.С., Блинов С.Ю., Лейман А.В., Кутузов И.М. Цифровые водяные знаки в графических файлах / Научно-технический вестник информационных технологий, механики, оптики. – 2013. – № 1. – С. 152–157.
2. Конахович Г.Ф., Пузыренко А.Ю., Компьютерная стеганография. Теория и практика. – К. «МК-Пресс». – 2006. – 288 с.
3. Васина Т.С. Обзор современных алгоритмов стеганографии / Электронное научно-техническое издание «Наука и образование» МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2012. – С. 1–8.

**ОЦЕНКА ИНДЕКСА ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ
МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ**

Крень А.П.¹, Ланцман Г.А.¹, Делендик М.Н.²

¹Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

²Филиал БНТУ «Межотраслевой институт повышения квалификации и переподготовки кадров
по менеджменту и развитию персонала»
Минск, Республика Беларусь

Пластичность является важнейшей характеристикой, по которой оценивается способность материалов претерпевать значительную пластическую деформацию перед разрушением.

Как известно, стандартизированной мерой пластичности принято считать относительное удлинение δ_p и относительное сужение ψ , определяемые при разрушении во время испытаний на растяжение на испытательных машинах [1].

Данные показатели определяются разрушающим методом, не относящимся к экспресс-методам, которые крайне необходимы при диагностике технического состояния потенциально опасного промышленного оборудования.

Разработка более оптимальных методов определения пластичности, прежде всего, связана с применением методов индентирования, поскольку твердость H по своей сути представляет собой комплексную механическую характеристику, являющуюся функцией как прочностных, так и пластических свойств материала.

В работах [2–4] впервые было введено понятие и развиты теоретические представления о новой характеристике пластичности δ_H , также называемой индексом пластичности, определяемой при вдавливании в материал алмазной пирамиды Виккерса. Параметр δ_H рассчитывается как отношение величины пластической деформации к общей деформации в отпечатке испытуемого материала, образованном вдавливанием пирамиды.

$$\delta_H = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_t} = 1 - \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_t}, \quad (1)$$

где ε_p , ε_e и ε_t – соответственно пластическая, упругая и общая деформации в отпечатке.

Если применяемое оборудование позволяет производить запись кривой нагружения и разгрузки материала в координатах «контактное усилие P – перемещение индентора h », то характеристика пластичности может быть найдена также согласно выражению [5]:

$$\delta_W = \frac{W_p}{W_t} = 1 - \frac{W_e}{W_t}, \quad (2)$$

где W_p , W_e и W_t – соответственно пластическая, упругая и общая работа деформирования материала.

В работе предлагается применить для оценки пластичности метод динамического индентирования (МДИ), который заключается в однократном

микроударном воздействии на материал жестким индентором и регистрации изменения во времени основных параметров ударного контакта (рисунок 1). Основным источником информации о свойствах материала при индентировании является зависимость «контактное усилие P – глубина вдавливания индентора h » (рисунок 1, б).

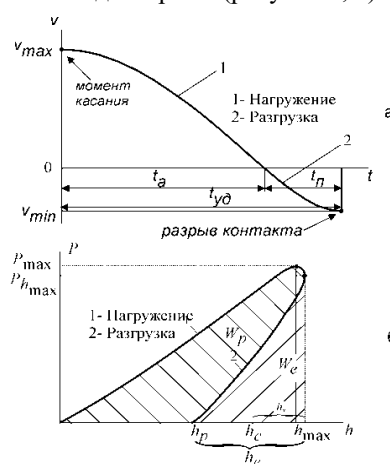


Рисунок 1 – Характерные зависимости, описывающие процесс внедрения индентора в металл:
а – зависимость изменения скорости $V(t)$;
б – изменение контактного усилия от глубины вдавливания $P(h)$

Рассмотрим возможность измерения параметра δ_H при динамическом индентировании сферическим индентором. Пластичность будем определять по формулам (3) и (4). Для выражения деформации воспользуемся рекомендациями Тейбора [6], в соответствии с которыми общая деформация ε_t в отпечатке (рисунок 2) в момент достижения максимальной глубины вдавливания h_{max} будет равна:

$$\varepsilon_t = 0,2 \frac{d_c}{D}, \quad (3)$$

где d_c – контактный диаметр пластического отпечатка; D – диаметр сферического наконечника индентора.

После завершения удара и восстановления упругих деформаций в отпечатке, остается пластический отпечаток глубиной h_p , диаметр проекции которого остается равным контактному диаметру d_c , а диаметр сферы, которой может быть описан отпечаток в испытуемом металле, становится равным D_1 .

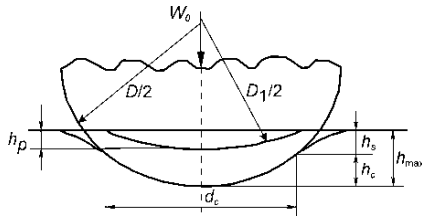


Рисунок 2 – Схематическое представление поперечного сечения отпечатка при деформировании материала сферическим индентором

По аналогии с предыдущей формулой, выражение для пластической деформации будет:

$$\varepsilon_p = 0,2 \frac{d_c}{D_1}. \quad (4)$$

Найдем выражение, связывающее D и D_1 , используя геометрическое соотношение между d_c , и контактной глубиной h_c . Для момента, соответствующему максимальному внедрению h_{max} , для развитых пластических деформаций можно записать: $d_c = 2\sqrt{Dh_c}$. После завершения удара контактный диаметр будет равен: $d_c = 2\sqrt{D_1h_p}$. Откуда:

$$D_1 = D \frac{h_c}{h_p}. \quad (5)$$

Подставляя D_1 в формулу (5) получим выражение для пластической деформации:

$$\varepsilon_p = 0,2 \frac{d_c h_p}{D h_c}. \quad (6)$$

Совместное решение выражений (3), (5) и (8) дает формулу для расчета динамической пластичности δ_H^d посредством значений глубин вдавливания:

$$\delta_H^d = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_t} = \frac{h_p}{h_c}. \quad (7)$$

Выражая h_c через h_{max} : $h_c = h_{max} - 0,5h_e$, получим:

$$\delta_H^d = \frac{h_p}{h_{max} - 0,5h_e}. \quad (8)$$

Если рассматривать формулу (4), то для динамического индентирования ее можно преобразовать в более удобный вид, поскольку известна масса индентора m , его предупредная скорость (скорость в момент касания) V_{max} и скорость отскока (в момент разрыва контакта индентора с образцом) V_{min} . Так, полная энергия удара может быть рассчитана как:

$$W_t = \frac{mV_{max}^2}{2}. \quad (9)$$

Энергия упругого отскока индентора:

$$W_e = \frac{mV_{min}^2}{2}. \quad (10)$$

Энергия пластического деформирования материала:

$$W_p = W_t - W_e. \quad (11)$$

Решая (4), (11)-(13) совместно, получим:

$$\delta_w^d = 1 - \frac{V_{min}^2}{V_{max}^2} = 1 - e^2. \quad (12)$$

где e – коэффициент восстановления скорости.

Эксперименты по определению пластичности с помощью МДИ проводились с различной предупредной скоростью V_{max} в диапазоне 0,4–4 м/с (при этом достигаемая скорость деформации находилась в диапазоне 500–2 500 с⁻¹) на цветных металлах и сталях, имеющих различную твердость.

На рисунке 3 показана связь между параметрами δ_w^d и δ_H^d , которая построена с использованием значений, полученных для всего диапазона изменения V_{max} .

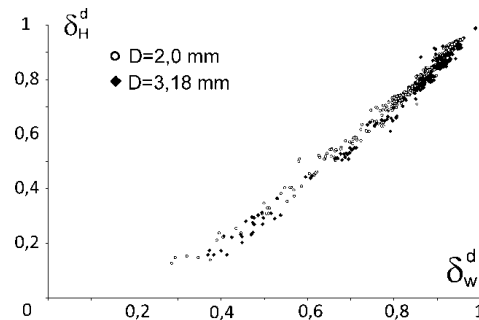


Рисунок 3 – Связь параметров δ_w^d и δ_H^d

Данные расхождения возможно вызваны различными принципами регистрации процесса индентирования, точностью определения параметров внедрения, а также допущениями (о нахождении материала в состоянии полной пластичности), принятыми при расчете d_c .

Исследована возможность определения параметра пластичности МДИ сферическим индентором. Предложены выражения для его определения, позволяющие использовать в расчетах непосредственно данные кривой ударного нагружения. Показана близость значений параметра пластичности, рассчитываемого исходя из глубин внедрения индентора и исходя из энергетических параметров индентирования (через коэффициент восстановления скорости).

Литература

1. ISO 6892-1:2019(en) Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature.
2. Yu.V. Milman, b.A. Galanov, and S.I. Chugunova, Acta Met. Mater., 41, No. 9: 2523 (1993).
3. Yu.V. Milman, S.I. Chugunova, and I.V. Goncharova, High Temp. Mater. Processes, 25, Nos. 1–2: 39 (2006).
4. Y.t. Cheng and C.M. Cheng, Mater. Sci. Eng. R, 44, No. 4: 91 (2004).
5. Yu. V. Milman, S. I. Chugunova, I. V. Goncharova, A. A. Golubenko. Plasticity of Materials Determined by the Indentation Method // Usp. Fiz. Met., 2018, vol. 19, no. 3. DOI: 10.15407/ufm.19.03.271.
6. Tabor D. The Hardness of Metals / D. Tabor. London: Oxford University Press, 1951. – 173 p.

УДК 621.891

**РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВОГО ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
НА БАЗЕ ОТЛАДОЧНОГО КОМПЛЕКТА ARDUINO****Тявловский А.К., Поводайко А.Д., Пантелеев К.В., Жарин А.Л., Свистун А.И., Гусев О.К.***Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Преимущества цифровых методов обработки сигналов зондовой электрометрии неоднократно рассматривались ранее [1]. К ним, в частности, относятся высокое быстродействие, возможность работы в режиме большого сигнала, что улучшает отношение сигнал / шум, возможность автоматического определения дополнительных параметров сигнала на основе анализа его амплитудного и фазового спектра. В связи с большим разнообразием режимов, реализуемых зондовыми электрометрическими преобразователями при исследованиях различных материалов (режимы вибрирующего и невибрирующего зондов Кельвина, полной или неполной компенсации измерительного сигнала, режим анализа поверхностной фотоЭДС и др.), целесообразной является разработка универсального цифрового электрометрического преобразователя на основе отладочной микропроцессорной платы общего назначения, обеспечивающего простое изменение конфигурации измерительной системы путем модификации программного обеспечения микропроцессора.

В качестве основы для разработки была выбрана отладочная плата *Arduino Mega 2560*. Данная плата поддерживает до 54 цифровых линий ввода-вывода, до 14 каналов широтно-импульсной модуляции (ШИМ), содержит мультиплексированный 10-битный аналого-цифровой преобразователь с возможностью подключения до 16 аналоговых входов. На плате имеется 4 последовательных порта *UART*, 5 п *SPI*, 6 независимых таймеров. Объем встроенной памяти составляет 256 Кбайт *flash*, 8 Кбайт *SRAM* памяти данных, 4 Кбайт *EEPROM*. Быстродействие *Arduino Mega 2560* достигает 16 *MIPS*.

Для реализации режима вибрирующего зонда Кельвина в состав разработанного преобразователя включен низкочастотный генератор возбуждения колебаний чувствительного элемента зонда. Также особой схемотехнической реализации потребовал входной предварительный усилитель измерительного сигнала, к которому предъявляются повышенные требования по входному активному сопротивлению и входной емкости. Разработанная принципиальная электрическая схема универсального цифрового электрометрического преобразователя приведена на рисунке.

Предварительный усилитель выполнен по схеме зарядочувствительного усилителя на основе микросхемы операционного усилителя *LMP7715* (входное сопротивление – 1 ГОм). Данный усилитель обладает комплексом уни-

кальных параметров, а именно типичное паспортное значение входного тока составляет 0,5 пА, уровень собственных шумов не превышает 5,8 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Напряжение компенсации подается через инвертирующий вход. Обусловленная этим погрешность незначительна ввиду того, что выбранная микросхема имеет напряжение смещения ± 20 мкВ. Существенное влияние на точность измерений контактной разности потенциалов электрометрическим зондом оказывают различные паразитные емкости, образованные зондом и компонентами предварительного усилителя. Их влияние на результат измерений усиливается, если последние имеют высокий потенциал относительно зонда. В связи с этим питание входного усилителя выбрано небольшим ($\pm 2,5$ В). Использование в питании усилителя «плавающей земли» позволяет сохранить соотношение потенциалов зонда неизменным при изменении напряжения компенсации в широких пределах.

Источник «плавающего» питания выполнен на усилителях DA6.1 и DA6.2 (рисунок). Опорное напряжение создается прямо смещенными диодами VD1, VD2. Усилитель DA6.3 служит буфером, а его выход формирует «виртуальную землю» для предварительного усилителя. Выходной сигнал с предварительного усилителя дополнительно усиливается и фильтруется в требуемом диапазоне частот операционным усилителем DA6.4.

Конструктивно предварительный усилитель выполнен на гибкой печатной плате, что обеспечивает возможность его вибрации вместе с зондом и исключает необходимость применения проводов во входной высокоомной цепи.

Генератор возбуждения колебаний стоит из цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), усилителя, блока управления и блока индикации. В схеме генератора используется ЦАП взвешивающего типа (делитель Кельвина). Блок управления включает переключатели выбора режима и энкодер. Режим работы генератора и частота генерируемого сигнала отображаются на жидкокристаллическом индикаторе *LCD 5110*. Диапазон генерируемых частот, задаваемый энкодером, составляет 1 Гц–8 МГц. Дискретность установки частоты составляет 1 Гц либо 100 Гц, в зависимости от выбранного режима.

Разработанная конструкция дает возможность получить полные характеристики сигнала в реальном масштабе времени, что позволяет значительно ускорить процесс сканирования поверхности малогабаритным зондом Кельвина.

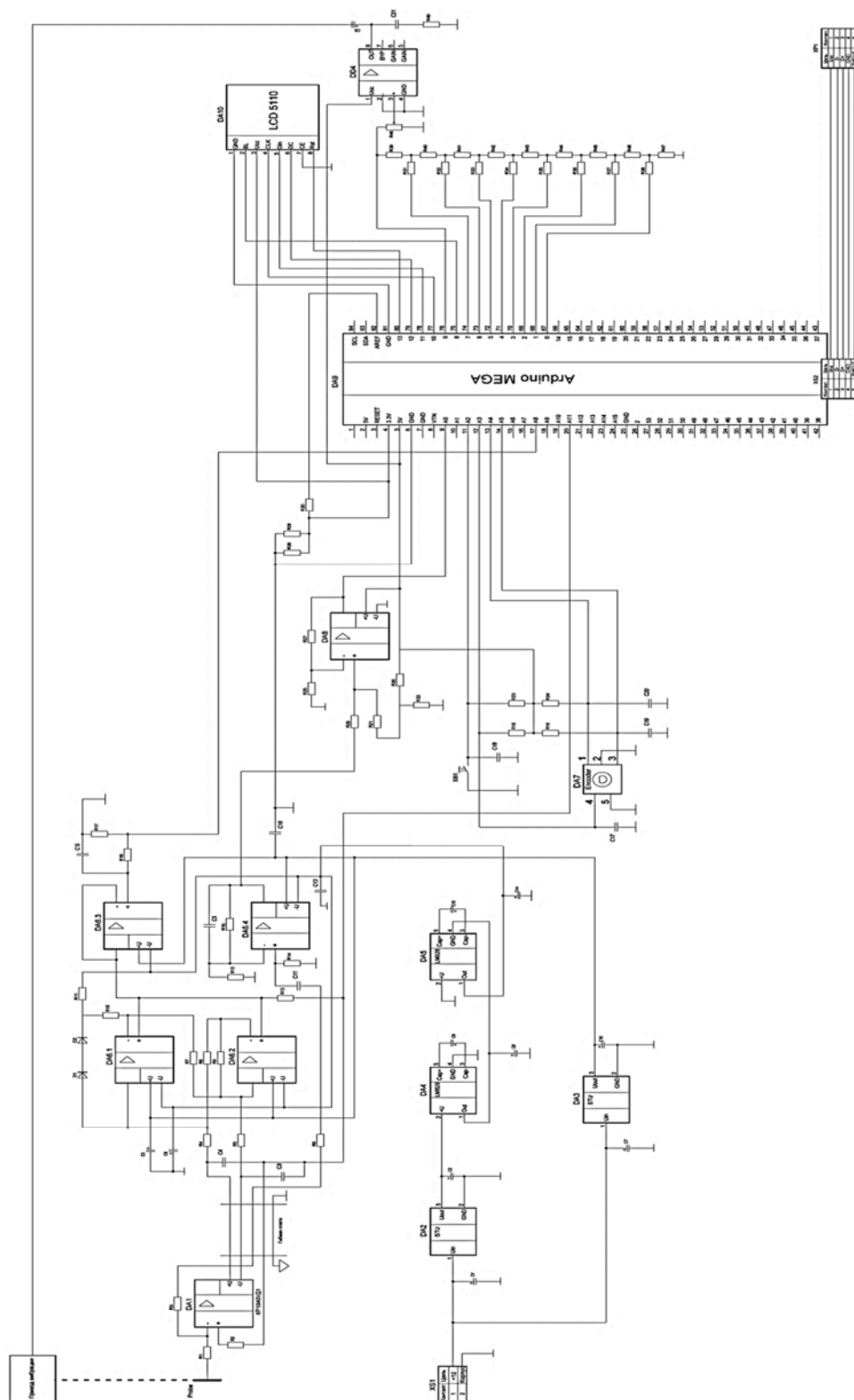


Рисунок – Принципиальная схема цифрового электрометрического преобразователя на базе *Arduino Mega 2560*

Литература

1. Пантелеев К.В., Свистун А.И., Тяловский А.К., Жарин А.Л. Цифровой измеритель контактной разности потенциалов. Приборы и методы измерений. 2016;7(2):136–144.

2. Пантелеев К.В., Микитевич В.А., Жарин А.Л. Построение измерителей контактной разности потенциалов. Приборы и методы измерений. 2016;7(1):7–15. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2016-7-1-7-15>.

УДК 620.179

ОЦЕНКА ПРЕЦИЗИОННОСТИ ПРИБОРА НТ-800 ДЛЯ КОНТРОЛЯ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ

Кутепов А.Ю., Крень А.П., Гнутенко Е.В.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

В настоящее время вследствие отсутствия государственных эталонов не существует общепринятой методики подтверждения метрологических характеристик приборов для определения уровня внутренних напряжений. При этом существует довольно большой парк приборов, основанных на ультразвуковых, магнитных, электрических измерениях, и позволяющих дать оценку напряжений на основании данных сравнительных испытаний, при которых напряжения создаются путем растяжения или сжатия образцов. В ИПФ НАН Беларуси был разработан прибор НТ-800, который позволяет проводить измерения толщины никелевых покрытий в диапазоне от 200 до 800 мкм, проводить оценку уровня действующих напряжений, а также строить карту распределения напряжений. Исходной величиной, по которой оценивается величина напряжений является магнитоотрывное усилие K_F , используемое при построении градуировочных зависимостей. В настоящей работе были проведены исследования по определению таких точностных показателей разработанных датчиков прибора, как повторяемость и воспроизводимость K_F согласно СТБ ИСО 5725.

Для проведения испытаний был использован НТ-800 с датчиком для контроля покрытий в труднодоступных местах и датчиком для контроля покрытий на плоских поверхностях (рисунок 1). Уровни испытаний (по СТБ ИСО 5725): специальные никелевые образцы, имитирующие покрытия, с различной толщиной и внутренними напряжениями представлены в таблице 1.



Рисунок 1 – ИИК НТ-800 с датчиками для контроля покрытий в труднодоступных местах и на плоских поверхностях

Указанная в таблице степень прокатки образцов позволила создать внутренние напряжения в никелевых образцах, которые по своим значениям перекрывают реальный диапазон изменения напряжений (0–200 МПа) в никелевых покрытиях, получаемых по гальванической технологии.

Нулевой уровень внутренних напряжений в никелевых образцах, имитирующих покрытия, создавался путем термообработки – отпуска образцов.

Таблица 1 – Характеристики никелевых образцов

Уровень испытаний (номер образца)	Толщина h, мкм	Степень прокатки, %	Уровень испытаний (номер образца)	Толщина h, мкм	Степень прокатки, %
1	200	0	7	400	10
2	215	14	8	400	40
3	240	0	9	500	0
4	300	0	10	500	30
5	330	34	11	580	13
6	400	0	12	700	0

Для оценки повторяемости каждым оператором на каждом уровне испытаний было проведено по 10 измерений. Для оценки воспроизводимости было задействовано 6 операторов.

На каждом уровне испытаний для каждого оператора были рассчитаны среднее арифметическое измерений величины K_F , пропорциональной магнитоотрывному усилию, и внутриэлементное стандартное отклонение. Затем были рассчитаны средние арифметические для каждого уровня.

Наличие выбросов с критическими значениями в 5 % для квазивыбросов и 1 % для выбросов определялось с использованием мер статистики Менделя (меры совместимости результатов между операторами) h для графического анализа данных на совместимость. Мера статистики h рассчитывалась по формуле

$$h_{ij} = \frac{\bar{y}_{ij} - \hat{m}_j}{\sqrt{\frac{1}{(p_j - 1)} \sum_{i=1}^{p_j} (\bar{y}_{ij} - \hat{m}_j)^2}}$$

где m – общее среднее по уровню; p – количество операторов.

Для того, чтобы определить, какие из рассчитанных значений h_{ij} являются выбросами, или квазивыбросами, на диаграмму наносились линии критических значений. Согласно СТБ ИСО 5725, при $p = 6$ это 1,87 и 1,66 для 1 % и 5 % соответственно. Если значение статистики h превышало линию, соответствующую 5 % уровню значимости, то соответствующий ей базовый элемент признавалось квазивыбросом, если значение статистики h превышало линию, соответствующую 1 % уровню значимости, то соответствующий ей базовый элемент признавался вы-

бросом. Диаграмма статистик Менделя h показана на рисунке 2.

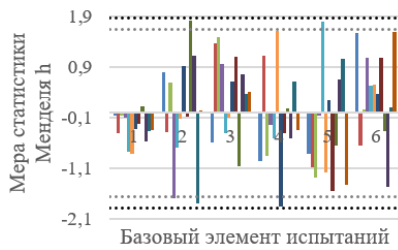


Рисунок 2 – Меры статистики Менделя h измерений при использовании датчиков с чувствительным элементом, представляющим собой магнит, предназначенный для контроля напряжений в никелевых покрытиях

Дополнительно графический анализ данных на совместимость был проведен с использованием мер статистики Менделя k , рассчитанными по формуле:

$$k_{ij} = \frac{s_{ij}\sqrt{p_j}}{\sqrt{\sum s_{ij}^2}}$$

Диаграмма статистик Менделя k измерений величины, пропорциональной магнитоотрывному усилию, показана на рисунке 3. Для того, чтобы определить, какие из рассчитанных значений k_{ij} являются выбросами, или квазивыбросами, на диаграмму наносятся линии критических значений. Согласно СТБ ИСО 5725, для $p = 6$ и количества измерений в базовом элементе, равным 10, критические значения равны 1,47 и 1,33 для 1 % и 5 % соответственно.

Обработка выбросов происходила по диаграммам (рисунки 2 и 3) следующим образом: при наличии единичных выбросов у оператора, эти значения удалялись, в случае же, если у одного оператора более половины измерений были либо выбросами, либо квазивыбросами, сам оператор обозначался выбросовым и не учитывался в дальнейших расчетах.

УДК 621.317.799:621.382

МАТРИЧНЫЙ КОММУТАТОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВАХ И ВФХ

Лисенков Б.Н., Грицев Н.В.

ОАО «МНИПИ»

Минск, Республика Беларусь

При тестировании изделий микроэлектроники возникает необходимость измерения вольтамперной (ВАХ) и вольтфарадной (ВФХ) характеристик объекта тестирования (ОТ), которые предъявляют к измерительному тракту противоречивые требования.

Достоверный результат измерения ВАХ в области малых токов и больших сопротивлений получают за счет устранения паразитных токов

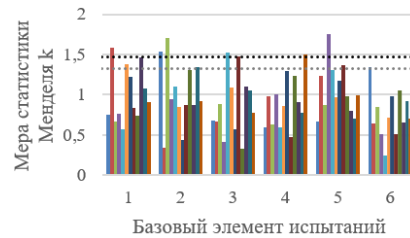


Рисунок 3 – Меры статистики Менделя k измерений при использовании датчиков с чувствительным элементом, представляющим собой магнит, предназначенный для контроля напряжений в никелевых покрытиях

После обработки выбросов для каждого уровня были рассчитаны дисперсии повторяемости и дисперсии воспроизводимости, которые впоследствии были пересчитаны в коэффициенты вариации и показаны на рисунке 4.

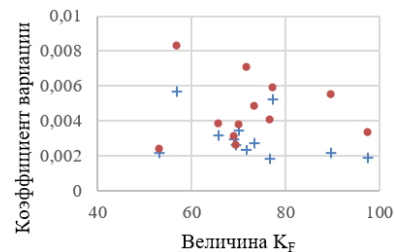


Рисунок 4 – Зависимость коэффициентов вариации повторяемости (+) и воспроизводимости (•) от величины K_F

Проведенные испытания показали высокую прецизионность результатов измерений всеми операторами: коэффициенты вариации измеренных значений K_F , рассчитанные по дисперсиям s_r^2 и s_R^2 , на всех уровнях не превышают 1%. Установлено, что значения дисперсий s_r^2 и s_R^2 практически не зависят от толщины контролируемого образца или внутренних напряжений в нем. При этом коэффициент вариации измеренных значений K_F снижается при увеличении толщины контролируемого образца.

утечки с помощью «охранной» поверхности и использования триаксиальных кабелей. При измерении ВФХ используют высокочастотный испытательный сигнал и коаксиальные кабели. Это требует перестройки измерительного тракта при тестировании ОТ.

В автоматизированных системах, выбор триаксиального или коаксиального тракта осуществляют с помощью матричного коммутатора

(МК), который должен обеспечить малые утечки при измерении ВАХ и малые искажения высокочастотного сигнала при измерении ВФХ.

Традиционный метод построения удовлетворяющего этим требованиям МК основан на введении в матрицу коммутации, состоящую из линий и колонок, дополнительных линий. При этом часть линий обеспечивает работу в триаксиальном тракте, а часть – в коаксиальном. Колонки матрицы, предназначенные для подсоединения МК к контактам ОТ, принимают участие в работе и того и другого тракта.

Очевидно, что увеличение количества линий матрицы ведет к увеличению количества узлов, то есть к увеличению количества реле и влечет за собой существенное усложнение конструкции и снижение надежности коммутатора.

Согласно разработанному методу формирования матрицы коммутации все ее линии и колонки используются при измерении как ВАХ, так и ВФХ благодаря коммутации линий матрицы к соответствующему триаксиальному или коаксиальному тракту с помощью дополнительных реле, объединенных в модуль коммутации. Этим обеспечивается многократное снижение количества узлов, по сравнению с традиционным методом.

Благодаря применению в узлах двоярных герконных реле, матрица осуществляет коммутацию двух, связанных между собой сигналов. При измерении ВАХ, наряду с испытательным сигналом, матрица коммутирует соответствующий ему сигнал «охраны», а при измерении ВФХ – возвратный ток, соответствующий высокочастотному испытательному сигналу, протекающему по экранирующей оплетке коаксиального кабеля.

На рисунке 1 представлена структурная схема разработанной матрицы коммутации.

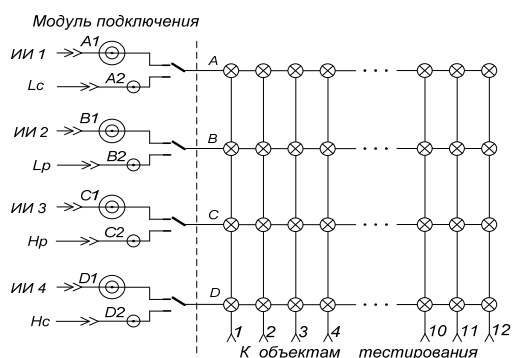


Рисунок 1 – Структурная схема матрицы коммутации с модулем подключения:

- ⊗ – двоярное герконное реле; $A1, B1, C1, D1$ – гнезда триаксиального тракта; $A2, B2, C2, D2$ – гнезда коаксиального тракта; A, B, C, D – линии матрицы коммутации; $1-12$ – выходные порты
- III1–III4 – сигналы измерителя ВАХ;
- Lc, Lp, Hc, Hp – сигналы измерителя импеданса

Модуль подключения, содержит 4 триаксиальных гнезда ($A1, B1, C1, D1$) для подключения измерителя ВАХ, 4 изолированных коаксиальных гнезда ($A2, B2, C2, D2$) для подключения измерителя импеданса и переключатели на два направления, отвечающие за подключение линий матрицы к триаксиальному или коаксиальному тракту.

Матрица коммутации выполнена в виде отдельного модуля в состав которого входят разъемы 1–12.

Результаты измерения емкости с помощью современных цифровых измерителей импеданса, основанных на автобалансировке моста операционным усилителем (метод вольтметра-амперметра), зависят от схемы подключения измеряемой емкости к измерителю импеданса. Наиболее востребованными схемами подключения являются схемы типов 2Т и 4Т.

Схема типа 4Т минимизирует ошибки, связанные с сопротивлением кабелей и контактов, что важно при измерении малых значений импеданса (большие емкости), а схема 2Т обеспечивает проведение измерений на более высокой частоте [1].

Поэтому, тип схемы подключения целесообразно изменять в зависимости от условий проведения измерений, то есть непосредственно в процессе тестирования.

Разработан метод изменения схемы подключения матрицы коммутации при измерении импеданса путем введения дополнительных операций коммутации, с помощью которых можно одновременно объединять испытательные сигналы в трактах Lc, Lp и Hc, Hp и объединять возвратные токи во всех этих трактах до их подачи на матрицу коммутации.

Возможность оперативного управления схемой подключения матрицы коммутации в процессе тестирования позволяет расширить диапазоны измерительных частот и измеряемых емкостей.

Структурная схема модуля подключения, реализующая предложенный метод изменения типа схемы подключения, представлена на рисунке 2.

При разомкнутых контактах реле $S5-S7$ модуль подключения формирует схему типа 4Т, при замыкании контактов реле $S5-S7$ – схему типа 2Т.

Из рисунка 2 видно, что объединение испытательных сигналов и соответствующих им возвратных токов возможно только в коаксиальном тракте, к которому подключен измеритель импеданса.

Таким образом, разработанный матричный коммутатор обеспечивает тестирование ВАХ и ВФХ, лишен существенной избыточности по количеству герконных реле и связанных с этим конструктивных и технологических затрат при-

сущих известным моделям коммутаторов и обеспечивает возможность управления схемой подключения при измерении емкостных параметров.

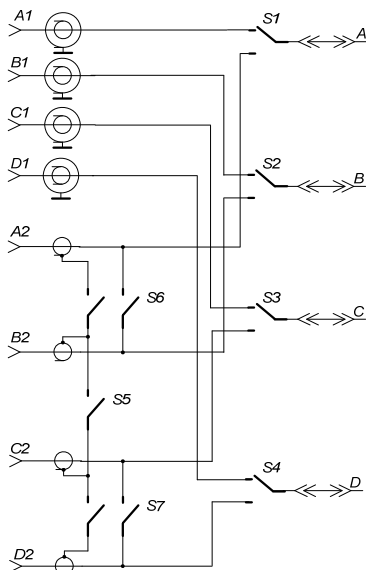


Рисунок 2 – Структурная схема модуля подключения:

- A1, B1, C1, D1 – гнезда триаксиального тракта;
- A2, B2, C2, D2 – гнезда коаксиального тракта;
- A, B, C, D – линии матрицы коммутации;
- S1–S7 – двойные герконные реле

Внешний вид задней панели коммутатора, на которой расположены гнезда триаксиального тракта A1, B1, C1, D1 для подключения измерителя ВАХ, изолированные гнезда коаксиального тракта A2, B2, C2, D2 для подключения цифрового измерителя импеданса, 12 портов матрицы коммутации, выполненные на основе клеммников разъемных и сетевой разъем питания, представлен на рисунке 3.

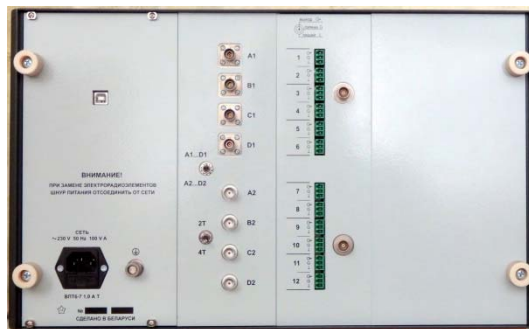


Рисунок 3 – Внешний вид МК, объемом 4×12, со стороны задней панели

Использование клеммников разъемных позволяет подсоединять к 12 портам МК контакты тестируемых изделий микроэлектроники с помощью триаксиальных или коаксиальных кабелей, в зависимости от требований к точности измерений и себестоимости оборудования.

Основные параметры разработанного матричного коммутатора, при использовании триаксиального тракта (измерение ВАХ) приведены в таблице 1.

Таблица 1

Ток смещения канала коммутации	≤0,2 нА
Напряжение смещения через 5 мин. после замыкания реле	≤0,2 мВ
Сопротивление изоляции	≥10 ГОм
Сопротивление канала коммутации	≤2 Ом

Полоса пропускания МК, при использовании коаксиального тракта (измерение ВФХ) составляет 10 МГц.

Литература

1. Keysight Technologies. The Parametric Measurement Handbook [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.keysight.com/find/>. – Дата доступа 14.03.2019.

УДК 543.645:57.033

БИОСЕНСОРНОЕ УСТРОЙСТВО ЕМКОСТНОГО ТИПА С КОНЦЕНТРИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Люцко К.С.¹, Реутская О.Г.¹, Плескачевский Ю.М.¹, Песнякевич А.Г.², Таратын И.А.³

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

³ОАО «Минский НИИ радиоматериалов»
Минск, Республика Беларусь

Одно из наиболее динамично развивающихся направлений измерительной техники в последние несколько десятилетий связано с разработкой и исследованием биосенсорных устройств. Из всего многообразия особое место занимают электрохимические биосенсорные устройства, интерес к которым обусловлен, с одной стороны, возможностью достижения вы-

сокой чувствительности, а с другой – минимальным объемом анализа, малыми затратами времени на измерения, относительной простотой преобразований сигналов, изготовления сенсора и его эксплуатации.

Одним из основных направлений в области создания современных биосенсоров является разработка устройств для многоцветного ис-

пользования. Это связано с механизмами взаимодействия между антигенами и антителами, которые позволяют восстанавливать компоненты иммобилизации.

Существуют различные методы электрохимического обнаружения биоорганизмов. При измерении электрических свойств для извлечения информации из биологических биоанализаторов обычно имеет место электрохимический характер. В этом случае биоэлектрохимический компонент служит основным элементом преобразования выходного сигнала [1].

В результате проведенного анализа существующих биосенсоров была предложена изображенная на рисунке 1 схема конструкции кристалла биосенсора.

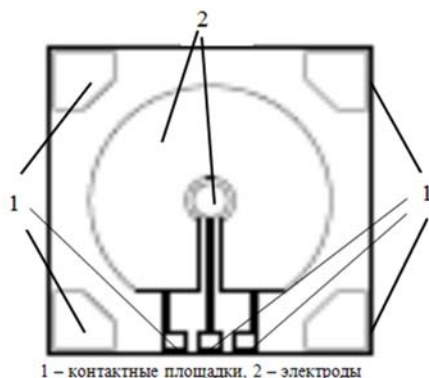


Рисунок 1 – Схема конструкции кристалла биосенсора

Основой данного биосенсора, является кремниевый кристалл толщиной 300 мкм с диэлектрическим слоем из оксида кремния толщиной 1 мкм, на поверхности которого сформированы золотые электроды толщиной 0,3 мкм, с подслоем титана толщиной 0,01 мкм.

На рисунке 2 представлено фотографическое изображение исследуемого кристалла биосенсора, имеющего размеры 5,4×5,4×0,3 мм на котором расположена конденсаторная структура, сформированная двумя концентрическими электродами с расстоянием между ними в 150 мкм.

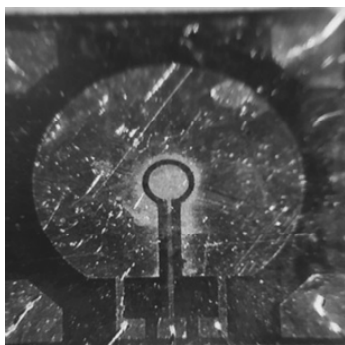


Рисунок 2 – Фотографическое изображение кристалла биосенсора

Так как размер межэлектронного зазора влияет на характеристики сигнала, то размеры элементов конструкции были выбраны с целью расширения аналитических возможностей биосенсора.

Показания биосенсорного устройства зависят от изменения заряда, который может накапливаться в результате изменения площади поперечного сечения анализируемого вещества, а также вследствие изменения диэлектрических свойств межэлектродного материала, за счет гибридизации на границе раздела электродов.

На данном биосенсорном устройстве было проведено исследование выходных характеристик для фитопатогенной грамположительной бактерии вида *Bacillus pumilus*, которая наносит серьезный экономический ущерб сельскому хозяйству, является возбудителем порчи пищевого сырья и продуктов питания, вызывает отравления, характеризуемые острым течением болезни. В настоящее время в бактериологических лабораториях идентификация бактерий *Bacillus pumilus* основана на выделении чистой культуры микроорганизмов и изучении их биохимических свойств. Этот метод трудоемок и недостаточно эффективен из-за выраженного полиморфизма ферментативных свойств бактерий *Bacillus pumilus*. Поэтому перед исследователями стоит задача разработки достоверного метода индикации и идентификации названных микроорганизмов. На сегодня вопрос о разработке ускоренной схемы идентификации *Bacillus pumilus* остается открытым. Нами предлагается подход, позволяющий с наименьшей трудоемкостью определить наличие данной культуры в исследуемом растворе [2].

В таблице представлены результаты измерения емкости биосенсора для определения биоанализируемых слоев.

Таблица – Результаты измерения емкости биосенсора в зависимости от концентрации числа бактерий в анализе

Концентрация клеток в анализируемом растворе N, КОЕ/мл	Емкость C, пФ
$6,03 \cdot 10^7$	20
$6,03 \cdot 10^6$	18
$6,03 \cdot 10^5$	45
$6,03 \cdot 10^3$	32

Для полученных результатов характерны: резкий рост емкости, стабилизация сигнала и равномерное линейное изменение емкости, что отображено на рисунке 3.

Подход к измерению выходного сигнала биосенсором для определения наличия биоорганизмов на его поверхности зависит от множества факторов. К таким определяющим факторам относятся: подготовка поверхности биоанализатора, наличие и состав иммобилизирующего слоя,

форма детектирующих элементов устройства, температура окружающей среды и т. д. [1].

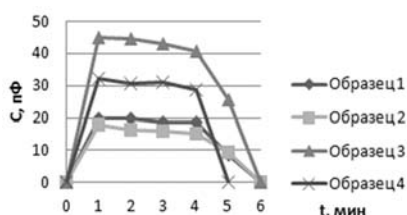


Рисунок 3 – Зависимость емкости от времени измерения для образцов *Bacillus pumilus* с разной степенью разбавления: 1 – исходная культура; 2 – культура разведена в 10 раз; 3 – культура разведена в 100 раз; 4 – культура разведена в 10 000 раз

Таким образом при проведении экспериментов была реализована следующая последовательность действий:

1. Подключение датчика к измерителю иммитанса Е 7-25.
2. Фиксация исходного значения.
3. Нанесение анализа размером 0,5–1 мкл при помощи микрошприца.
4. Фиксация выходного сигнала.
5. Очистка поверхности датчика.
6. Фиксация значения степени очистки путем измерения величины емкости на электродах биоанализатора.

Химическая обработка кристалла биосенсорного устройства необходима для очистки поверхности измерительного элемента с целью

исключения влияния возможных остатков анализируемого состава, предшествующего следующему эксперименту.

Если степень очистки элементов является неудовлетворительной, дополнительно может производиться отжиг при температуре выше 100 °С. При этом будут удалены органические остатки биологических структур, нанесённые ранее на поверхность датчика.

Необходимо отметить, что для уменьшения влияния физраствора на выходной сигнал биосенсора необходимо приступить к измерениям, начиная с наибольшей концентрации биоструктур, что соответствует минимальным концентрациям физраствора.

Работа выполнялась в рамках Государственной программы научных исследований «Конвергенция-2020», подпрограммы «Объединение».

Литература

1. Плещачевский, Ю.М., Исследование емкостных характеристик биоанализаторов на основе электродных биосенсорных устройств / Ю.М. Плещачевский, О.Г. Реутская, К.С. Люцко, А.Г. Песнякевич, И.А. Таратын // Материалы 12 МНТК «Приборостроение–2019» / под ред. О.К. Гусева [и др.]. – Мн.: БНТУ, 2019. – С. 30–32
2. Феоктистова Н.А., Выделение бактерий вида *Bacillus mesentericus* из объектов санитарного надзора / Н.А. Феоктистова, М.А. Юдина, Д.А. Васильев [и др.] // Молодежь и наука XXI века: материалы III-й Международной научно-практической конференции молодых ученых. – Ульяновск, 2010. – С. 82–84.

УДК 531.385

ЭЛЕКТРОПРИВОД ПРИБОРНЫХ СИСТЕМ

Малютин Д.М.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация

Электропривод широко применяется в информационно-измерительных и управляющих приборных системах [1–6]. Несмотря на то, что в настоящее время разработана достаточно широкая линейка электродвигателей [7], в ряде случаев параметры серийно выпускаемых промышленностью исполнительных двигателей не удовлетворяют требуемым техническим характеристикам разрабатываемого приборного механизма, например по развиваемому двигателем моменту. В этом случае для реализации «высокомоментного», компактного, быстродействующего исполнительного привода приборных систем с требуемыми техническими характеристиками и уменьшенным уровнем пульсаций по моменту в работе рассмотрен «пакетный» способ установки коллекторных датчиков момента постоянного тока на оси исполнительного механизма (рисунок 1). С целью уменьшения пульсаций

по моменту в исходном положении ротора датчиков момента смещены на небольшие углы относительно друг друга.

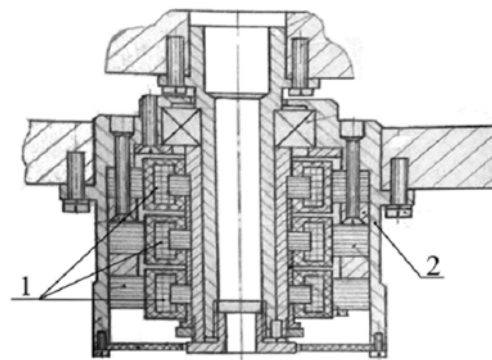


Рисунок 1 – «Пакетный» способ установки датчиков момента:

1 – ротора датчиков момента; 2 – корпусная деталь

Уравнения, описывающие работу исполнительного привода на основе трех датчиков момента, запишутся:

$$J_z \ddot{\delta} = M_{\Sigma} - M_n, \quad (1)$$

здесь J_z – момент инерции приведенный к выходной оси исполнительного привода; M_{Σ} – вращающий момент исполнительного привода; M_n – момент нагрузки, включающий приведенные к выходной оси моменты сухого и вязкого трения; δ – угловое ускорение выходной оси.

$$J_z \ddot{\delta} = c_{m1}i_{j1} + c_{m2}i_{j2} + c_{m3}i_{j3} - M_n, \quad (2)$$

здесь c_{mi} – коэффициент момента соответствующего датчика момента; i_{ji} – ток якоря соответствующего датчика момента.

Полагая, что $c_{m1} = c_{m2} = c_{m3}$ и $i_{j1} = i_{j2} = i_{j3}$

получим: $J_z \ddot{\delta} = 3c_m i_j - M_n$.

Ток якоря найдем из уравнения:

$$U_y = L_j \dot{i}_j + c_e \dot{\delta} + R_j i_j, \quad (3)$$

здесь U_y – входное напряжение, приложенное к якору двигателя с усилителя; L_j – индуктивность якоря; R_j – активное сопротивление якоря; c_e – коэффициент противоЭДС.

Переходя к операторной форме записи:

$$i_j(p) = \frac{U_y(p) - c_e \delta(p)p}{L_j p + R_j}, \quad (4)$$

$$J_z \delta(p)p^2 = 3c_m \left(\frac{U_y(p) - c_e \delta(p)p}{L_j p + R_j} \right) - M_n(p), \quad (5)$$

$$\text{отсюда: } \frac{\delta(p)p}{U_y(p)} = \frac{3c_m / R_j}{J_z T_{ds} p^2 + J_z p + \frac{3c_m c_e}{R_j}},$$

$$\text{где } T_{ds} = \frac{L_j}{R_j}.$$

Введем обозначения $K_{ds} = \frac{c_m}{R_j}$, $b = \frac{c_m c_e}{R_j}$,

тогда функционирование исполнительного привода может быть описано следующей передаточной функцией с учетом того, что $3T_{ds}b$ много меньше, чем J_z :

$$\frac{\delta(p)p}{U_y(p)} = \frac{3K_{ds}}{(T_{ds}p + 1)(J_z p + 3b)}. \quad (6)$$

Установка трех датчиков момента на одной оси приводит к увеличению эквивалентных коэффициента передачи и удельного момента сил вязкого трения в три раза по сравнению с

использованием одного датчика момента. Эквивалентная электромагнитная постоянная времени исполнительного привода равна постоянной времени одного датчика момента. Численные значения параметров передаточной функции находятся из соотношений:

$$\frac{\dot{\delta}_{xx}}{U_{bx}} = \frac{1}{c_e}, \quad c_m = \frac{M_{ds, nom}}{i_{nom}}, \quad K_{ds} = \frac{M_{ds, nom}}{U_{nom}},$$

$$b = \frac{M_{ds, n} - M_{ds, nom}}{\omega_{nom}}. \quad (7)$$

здесь $\dot{\delta}_{xx}$ – скорость холостого хода, U_{bx} – напряжение, соответствующее скорости холостого хода; $M_{ds, nom}$ – номинальный момент, U_{nom} – номинальное напряжение, ω_{nom} – номинальная скорость, $M_{ds, n}$ – пусковой момент.

В случае применения редуктора и трех датчиков момента, работающих на одну ось, передаточная функция исполнительного привода запишется в виде:

$$\frac{\delta(p)p}{U_y(p)} = \frac{3c_m i / R_j}{J_y T_{ds} p^2 + J_y p + \frac{3c_m c_e i^2}{R_j}} \quad (8)$$

или с учетом того, что $3T_{ds}b i^2$ много меньше, чем J_y :

$$\frac{\delta(p)p}{U_y(p)} = \frac{3K_{ds} i}{(T_{ds} p + 1)(J_y p + 3b i^2)}, \quad (9)$$

здесь i – передаточное отношение редуктора, J_y – момент инерции при использовании в исполнительном приводе редуктора.

При расчете суммарного момента инерции момент инерции ротора каждого из датчиков момента учитывается с множителем равным передаточному отношению редуктора, возведенному в квадрат – $J_a i^2$.

Заключение. Таким образом, с целью создания «высоко моментного», компактного, быстродействующего исполнительного привода приборных систем с требуемыми техническими характеристиками и уменьшенным уровнем пульсаций по моменту в работе рассмотрен «пакетный» способ установки нескольких коллекторных датчиков момента постоянного тока на оси исполнительного механизма. Приведен вариант конструкции без редукторного исполнительного привода. Приведено математическое описание без редукторного и редукторного исполнительных приводов на примере использования трех коллекторных датчиков момента постоянного тока.

Литература

1. Распопов В.Я., Малютин Д.М. Измерительные приборы и системы для ориентации, стабилизации и управления / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 4. – С. 372–386.

2. Малютин Д.М., Телухин С.В., Распопов В.Я. Гиросtabilизаторы оптической аппаратуры / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 10. – С. 290–300.

3. Распопов В.Я., Алалуев Р.В., Иванов Ю.В., Малютин Д.М. Информационно – измерительная и управляющая система многооборотного электропривода трубопроводной арматуры / Приборы и методы измерений. – 2011. – № 2 (3). – С. 33–40.

4. Алалуев Р.В., Малютин Д.М., Плясов А.В., Распопов В.Я., Сидоров П.Г. Испытания многообо-

ротного электропривода для управления, регулирования и мониторинга запорной арматуры магистралей трубопроводного транспорта / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2012. – № 12-1. – С. 77–88.

5. Дмитриев А.В., Кухарь В.Д., Распопов В.Я., Малютин Д.М., Рогов С.В., Родионов В.И. Электропривод для управления потоками рабочей среды. Патент на полезную модель RU112973 U1, 27.01.2012.

6. Малютин Д.М. Конструкции многооборотных электроприводов трубопроводной арматуры: учебное пособие / Тула : Изд-во ТулГУ, 2014. – 121 с.

7. Горлов В.Ф., Дмитриев В.А., Распопов В.Я. Завод и кафедра / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 9–2. – С. 274–284.

УДК 621.382

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ Жарин А.Л.¹, Петлицкий А.Н.², Пилипенко В.А.², Тявловский А.К.¹, Тявловский К.Л.¹, Гусев О.К.¹, Воробей Р.И.¹, Пантелеев К.В.¹

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Республика Беларусь

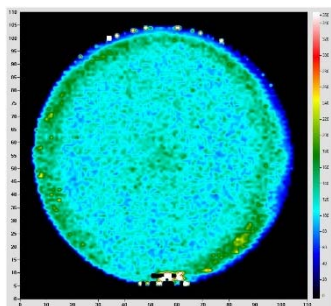
Большинство традиционных методов технологического контроля полупроводниковых пластин, используемых в производстве изделий микроэлектроники, связаны с использованием разрушающих воздействий либо требуют создания непосредственного контакта с поверхностью образца, что делает последний непригодным для дальнейшего использования в технологическом процессе. В связи с этим в таких исследованиях используются, как правило, пластины-спутники, что исключает возможность сплошного входного, а также промежуточного, контроля исходных пластин и формируемых структур. Методы зондовой электрометрии, основанные на бесконтактной регистрации поверхностного электрического потенциала (контактной разности потенциалов), выгодно отличаются отсутствием какого-либо повреждающего воздействия на поверхность образца. Реализация данных методов в режиме сканирования обеспечивает не только выявление, но и точную локализацию мест расположения дефектов поверхности. Для уточнения физической природы дефектов электрометрические измерения могут быть дополнены неразрушающими воздействиями на поверхность, в частности, освещением монохроматическим или белым светом, нагревом инфракрасным излучением и др.

В частности, различные режимы сканирующих зондовых электрометрических измерений с дополнительными неразрушающими воздей-

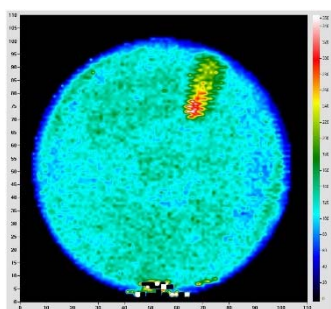
ствиями на поверхность полупроводниковой пластины реализованы в серии измерительных установок СКАН (СКАН-2013, СКАН-2015, СКАН-2019), созданных в НИЛ полупроводниковой техники Белорусского национального технического университета. Данные установки нашли применение при выявлении и исследовании дефектов поверхности полупроводниковых пластин в условиях реального производства.

Непосредственно регистрируемая средствами зондовой электрометрии контактная разность потенциалов (КРП) является комплексным параметром, зависящим от большого количества факторов. Вследствие этого визуализация пространственного распределения КРП, обеспечиваемая в установках серии СКАН как базовая функция, позволяет выявлять дефекты поверхности полупроводниковой пластины, но не характеризовать их физическую природу. Для анализа дефектов, связанных с изменениями длины диффузии неосновных носителей заряда (ННЗ) в кремнии измерения могут выполняться в режиме исследования поверхностной фотоЭДС на нескольких (не менее двух) длинах волн оптического излучения. Реализация данного режима в установках СКАН обеспечивает не только качественное, но и количественное определение длины диффузии ННЗ с визуализацией её пространственного распределения по всей поверхности пластины с высоким пространственным разрешением (не хуже

0,5 мм). На рисунке 1 приведены полученные методом сканирующей фотоЭДС визуализированные изображения пространственного распределения длины диффузии ННЗ двух исходных пластины: бездефектной (вверху) и имеющей дефект поверхности (внизу). На втором изображении четко просматривается расположение дефекта, определены его количественные параметры (значения длины диффузии ННЗ в области дефекта).



а



б

Рисунок 1 – Визуализированные изображения пространственного распределения длины диффузии ННЗ бездефектной полупроводниковой пластины (а) и пластины с дефектом (б), полученные методом сканирующей зондовой электрометрии

Следует отметить, что измерения в режиме сканирующей фотоЭДС и визуализация их результатов выполняются в реальном масштабе времени, что позволяет использовать данный режим установок СКАН для целей межоперационного контроля технологических процессов производства изделий микроэлектроники.

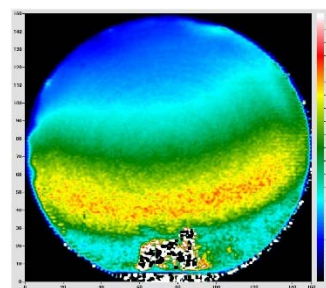
Дефекты полупроводниковых пластин, возникающие непосредственно в процессе производства, в значительном количестве случаев связаны с загрязнением поверхности нежелательными примесями, из которых наибольшее значение имеет примесь железа. Анализ распределения данной примеси по поверхности пластины после различных технологических операций может способствовать выявлению источника примеси, а также позволяет оценить пригодность пластины для изготовления полупроводниковых структур. Для выполнения такого анализа конструкция измерительной установки СКАН-2015 предусмотрен специальный режим работы, при котором исследование проводится в несколько этапов:

1. Регистрируется пространственное распределение длины диффузии ННЗ в режиме сканирующей фотоЭДС.

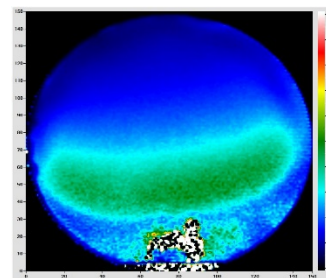
2. Осуществляется нагрев пластины длинноволновым инфракрасным излучением до температуры 200 °С и выдержка при такой температуре в течение 15 минут. Такой нагрев приводит к обратимому распаду пар Fe-B с выделением интерстициального железа, но не оказывает влияния на сформированные приборные структуры и потому относится к неразрушающим воздействиям.

3. Выполняется повторная регистрация пространственного распределения длины диффузии ННЗ в режиме сканирующей фотоЭДС.

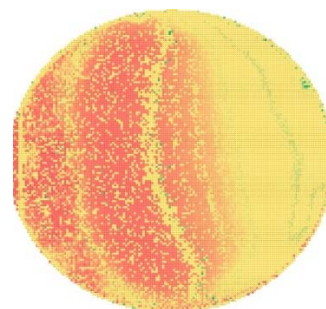
4. Концентрация примеси железа в кремнии рассчитывается на основании значений длины диффузии ННЗ в кремнии до и после нагрева в каждой точке поверхности полупроводниковой пластины в соответствии с математическими моделями влияния пар Fe-B и интерстициального железа на длину диффузии ННЗ.



а



б



в

Рисунок 2 – Визуализация пространственного распределения примеси железа в кремнии для пластины-спутника диаметром 150 мм

Все перечисленные этапы измерений полностью автоматизированы, а расчет концентрации

примеси железа выполняется компьютерными средствами с использованием специально разработанного программного обеспечения. Следует отметить, что вследствие многоэтапности и большого объема выполняемых вычислений, а также необходимости длительной (около 24 ч) выдержки исследованных пластин при комнатной температуре для их возврата к исходному состоянию, соответствующему восстановлению пар Fe-B, такие измерения не относятся к исследованиям в реальном времени.

На рисунке 2 приведен пример исследования пространственного распределения примеси железа по поверхности полупроводниковой пластины-

спутника p -Si диаметром 150 мм без гетера с толщиной окисла 1000Å. На рисунке 2, а показано распределение длины диффузии ННЗ по поверхности пластины до нагрева, на рисунке 2, б – после нагрева. Визуализированные с использованием условных цветов результаты расчета концентрации железа в кремнии показаны на рисунке 2, в.

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность методов зондовой электротметрии в условиях реального производства и перспективность их использования во входном и межоперационном контроле технологических процессов изготовления изделий микроэлектроники.

УДК 531.385

СИСТЕМА КОРРЕКЦИИ ГИРОСТАБИЛИЗАТОРА ГРАВИМЕТРА С ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИЕЙ СИГНАЛА ПЕРВОГО ИНТЕГРАТОРА

Малютин Д.М.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация

Задача повышения точности гравиметрических измерений является актуальной [1–3]. Уровень точности применяемой аппаратуры для целей разведки месторождений углеводородного сырья должен обеспечивать уверенное обнаружение аномалий с амплитудой 0,1–0,2 мГал, в то время как средняя квадратическая погрешность измерений, присущая гравиметрическим комплексам, созданным в России и за рубежом, составляет 0,1–0,3 мГал. Обеспечение перспективной точности возможно при проведении работ, связанных с совершенствованием системы стабилизации, гравиметрического датчика, увеличением точности обработки гравиметрической информации, методики проведения гравиметрической съемки, увеличением точности навигационной информации о параметрах движения объекта-носителя.

Совершенствование системы стабилизации морского гравиметра возможно не только за счет совершенствования чувствительных элементов [4], но и за счет придания системе стабилизации новых свойств приспособляемости к заранее непредвиденным изменениям условий работы путем автоматического изменения своих свойств и параметров. Инерциальная система стабилизации не возмущаема параметрами движения носителя. Недостатком такого устройства является то, что ошибки начальной выставки, возмущающие моменты в осях подвеса гироскопа и другие факторы приводят к незатухающим и даже расходящимся колебаниям гиростабилизированной площадки с периодом Шулера относительно вертикали.

Рассмотрим устройство системы коррекции двухосной системы стабилизации (гировертикали), позволяющее обеспечить одновременно отсутствие ошибок удержания вертикали даже при ускоренном движении носителя и демпфирование собственных колебаний инерциальной гировертикали. На рисунке 1 показана функциональная схема коррекции двухосной гировертикали с параметрической коррекцией сигнала первого интегратора [5].

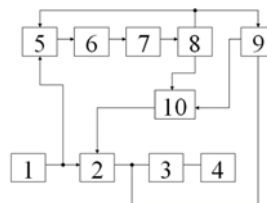


Рисунок 1 – Функциональная схема системы коррекции двухосной гировертикали

На рисунке 2 показана структурная схема системы коррекции двухосной гировертикали с параметрической коррекцией сигнала первого интегратора.

Работа прибора происходит следующим образом. Сигнал с выхода акселерометра 1, пропорциональный ускорению движения транспортного средства по отношению к Земле, подается на вход интегратора 2, с выхода которого сигнал поступает на усилитель 3 и далее на датчик момента гироскопа 4, что обеспечивает удержание в горизонте стабилизируемой площадки, с которой связана неподвижная опорная система координат.

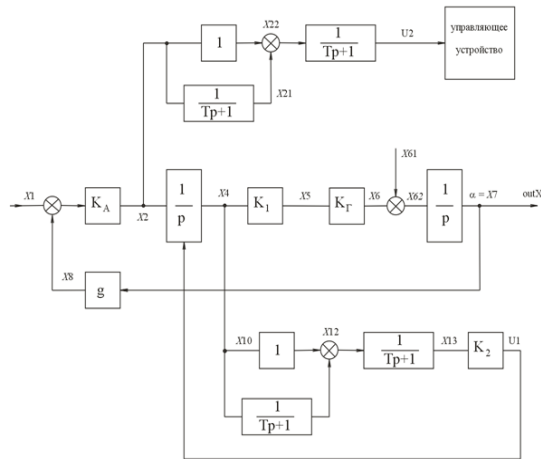


Рисунок 2 – Структурная схема системы коррекции двухосной гировертикали:

K_A – коэффициент передачи акселерометра;
 K_1, K_2 – коэффициенты усиления; K_G – коэффициент передачи гироскопа по управляющему воздействию;
 g – ускорение силы тяжести; T – постоянная времени;
 X_1 – линейное ускорение; X_i – промежуточные переменные, X_{61} – переносная угловая скорость;
 X_7 – погрешность удержания вертикали;
 U_2, U_1 – выходные сигналы фильтра наблюдателя и фильтра измерителя

Ошибки начальной выставки, возмущающие моменты в осях подвеса гироскопа и другие факторы приводят к возникновению незатухающих колебаний инерциальной вертикали относительно горизонта с периодом Шулера, что ухудшает точность стабилизации. Эти колебания измеряются акселерометром 1 в виде проекции ускорения силы тяжести и так же интегрируются интегратором 2. Сигнал с выхода интегратора 2 подается на вход полосового фильтра измерителя 9. Передаточная функция полосового фильтра измерителя 9 имеет вид:

$$W_1(p) = K_2 T p / (T \cdot p + 1)^2, \quad (1)$$

где $T = 84,4$ мин, K_2 – коэффициент передачи полосового фильтра измерителя. Полосовой фильтр измеритель при $K_2 = 2$ выделяет без искажения переменную составляющую сигнала интегратора 2 с частотой Шулера и эффективно сглаживает составляющие, имеющие частоты выше и ниже частоты Шулера. Сигнал на выходе полосового фильтра измерителя имеет нулевое отставание по фазе по отношению к выходному сигналу интегратора 2 на частоте Шулера. Сигнал с выхода акселерометра 1 подается на вход полосового фильтра наблюдателя 5, имеющего передаточную функцию:

$$W_2(p) = T p / (T \cdot p + 1)^2, \quad (2),$$

где $T = 84,4$ мин. Полосовой фильтр – наблюдатель 5 выделяет переменную составляющую сигнала акселерометра 1 с частотой Шулера и эффек-

тивно сглаживает составляющие, имеющие частоты выше и ниже частоты Шулера. Сигнал на выходе полосового фильтра наблюдателя 5 имеет нулевое отставание по фазе по отношению к выходному сигналу акселерометра 1 на частоте Шулера. Сигнал с выхода полосового фильтра наблюдателя 5 подается на вход компаратора 6. На выходе компаратора 6 положительным значениям выходного сигнала полосового фильтра наблюдателя 5 соответствует постоянный положительный уровень напряжения, а отрицательным значениям выходного сигнала полосового фильтра наблюдателя 5 соответствует постоянный отрицательный уровень напряжения. Сигнал с выхода компаратора поступает на вход фиксатора переходов 7, который выдает сигнал на вход схемы управления 8 в момент смены знака на выходе компаратора 6. По сигналу с выхода фиксатора переходов 7 схема управления 8 обеспечивает срабатывание ключа 10. При этом выходной сигнал полосового фильтра измерителя поступает на второй вход интегратора 2 и из текущего значения интегратора 2 вычитается текущее значение выходного сигнала полосового фильтра измерителя 9. Далее схема управления 8 обеспечивает приведение ключа 10 в исходное состояние «разомкнут» и установку текущего значения на выходе полосового фильтра измерителя 9 равным нулю, а также установку текущего значения на выходе полосового фильтра наблюдателя 5 равным нулю. При этом стабилизируемая площадка находится в горизонте, а на выходе интегратора 2 переменная составляющая с частотой Шулера оказывается скомпенсированной, что обеспечивает демпфирование собственных колебаний инерциальной вертикали. Параметрическая коррекция сигнала интегратора 2 не нарушает условие инвариантности по отношению к линейным ускорениям качки объекта. Таким образом, гиростабилизатор гравиметра обеспечивает нулевую погрешность удержания гравиметра по отношению к вертикали даже при ускоренном движении объекта. На основании предложенной математической модели разработана программа имитационного моделирования работы гиростабилизатора гравиметра.

На рисунке 3 представлена зависимость угла отклонения стабилизируемой площадки по отношению к горизонту от времени.

На рисунке 4 представлена зависимость X_4 – величины выходного сигнала интегратора 2 (в единицах цифрового кода) от времени.

На рисунке 5 представлена зависимость U_1 – величины выходного сигнала фильтра измерителя 9 (в единицах цифрового кода) от времени.

На рисунке 6 представлена зависимость U_2 – величины выходного сигнала фильтра наблюдателя 5 (в единицах цифрового кода (ед. ц. к.)) от времени.

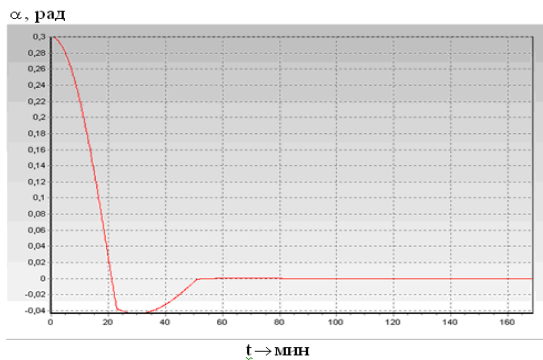


Рисунок 3 – График погрешности стабилизации

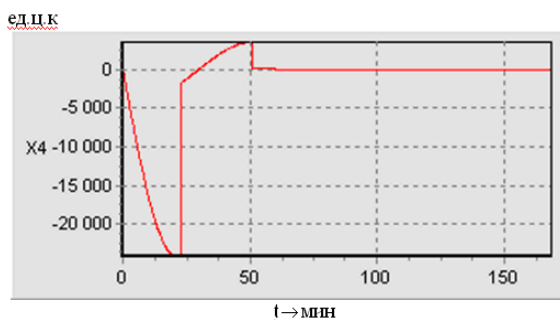


Рисунок 4 – Выходной сигнал интегратора

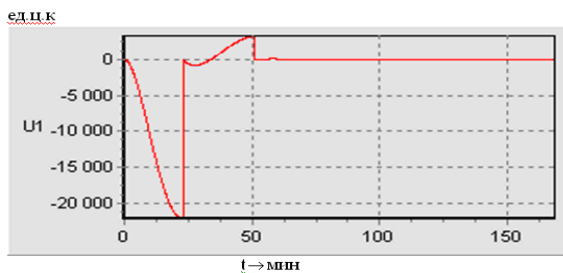


Рисунок 5 – Выходной сигнал фильтра измерителя

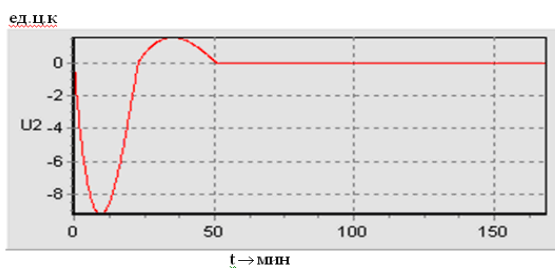


Рисунок 6 – Выходной сигнал фильтра наблюдателя

Моменты времени $t_1 = 22,9$ мин., $t_2 = 51$ мин., $t_3 = 59,7$ мин., $t_4 = 85,4$ мин соответствуют момен-

там смены знака на выходе компаратора б и параметрической коррекции сигнала интегратора 2. В момент времени $t_1 = 22,9$ мин амплитуда отклонения гиросtabilизированной площадки от горизонта уменьшается в восемь раз, а в процессе последующих циклов работы системы коррекции в момент времени $t_4 = 85,4$ мин амплитуда отклонения гиросtabilизированной уменьшается уже в 30 000 раз и составляет 0,00001 рад.

Заключение

Таким образом, в работе с целью повышения точности предложена структура построения контура коррекции гиросtabilизатора гравиметра с параметрической коррекцией показаний первого интегратора. Разработано математическое и программное описание функционирования данной системы. Проведено имитационное моделирование работы системы. Показано, что двухосная гировертикаль инвариантна к ускоренному движению носителя и одновременно в системе обеспечено демпфирование собственных колебаний. Нулевая погрешность прибора из-за ускорений основания позволяет обеспечить нулевые погрешности гравиметрических измерений из-за наклонов гиросtabilизированной платформы и из-за наклонов и ускорений гиросtabilизированной платформы.

Литература

1. Железняк Л.К., Краснов А.А., Соколов А.В. Влияние инерционных ускорений на точность гравиметра «ЧЕКАН-АМ» / Физика Земли, 2010. – № 7. – С. 29–32.
2. Малютин Д.М., Распопов В.Я. Исследование динамики гиросtabilизатора морского гравиметра с самонастройкой параметров / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Вып. 7. – 2017. – С. 97–105.
3. Малютин Д.М. Математическая модель гиросtabilизатора гравиметра с комбинированным управлением и самонастройкой параметров / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 10. – С. 226–232.
4. High-precision algorithmic compensation of temperature instability of accelerometers scaling factor / Alaluev R.V., Ivanov Yu.V., Malyutin D.M., Raspopov V.Ya., Dmitriev V.A., Ermilov S.P., Ermilova G.A. // Automation and Remote Control. 2011. – Vol. 72. – № 4. – Pp. 853–860.
5. Малютин Д.М., Кутуров А.Н., Малютина М.Д. Система коррекции гиросtabilизатора морского гравиметра / Патент на изобретение RU2282147 C1, 20.08.2006.

УДК 004.056

ФОРМАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАЗРАБОТКИ ПОДСИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ЗАЩИЩЕННОСТИ ФАЙЛООБМЕННОГО СЕРВИСА

Медведев Н.В.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Москва, Российская Федерация*

Задача проектирования и разработки информационной системы управления показателями защищенности сервиса для обмена сообщениями на платформе Android заключается не только в самом управлении доступом, с которой справляются формальные модели доступа, описанные ранее, но и в обеспечении безопасности файлов от возможных угроз нарушения конфиденциальности или целостности. То есть защита на более высоком уровне.

Сама концепция открытости мобильной платформы Android несёт как преимущества, так и недостатки. Преимуществами являются большой выбор устройств и доступность средств разработки. Недостатком же – большое количество всевозможных угроз безопасности системы [1].

Таковым предполагается назначить критерий, задаваемый через средний предотвращенный ущерб системе при использовании мер и средств защиты, направленных на противодействие угрозам безопасности. Под системой в данной работе понимается объединение пользовательского приложения и его среды функционирования.

Обеспечивать безопасность системы планируется использованием совокупности программных и организационных мер защиты. Предусмотреть защиту от всех угроз безопасности невозможно, потому что это нивелировало бы экономическую целесообразность использования приложения.

Поэтому дополнительным критерием оптимальности будет являться стоимость использования соответствующих мер и средств защиты. Данная стоимость не должна превышать некий порог, устанавливаемый заказчиком разработки.

Соответственно возникает необходимость выделения критических угроз, предотвращение которых является обязательной процедурой, несмотря на их стоимость, потому что иначе теряется смысл использования всего приложения – оно будет скомпрометированным по умолчанию.

Возможные угрозы делятся на два типа: угрозы среде функционирования и угрозы при работе из-под приложения. Первый тип угроз направлен на вмешательство в нормальное функционирование приложения со среды операционной системы, второй – на эксплуатацию уязвимостей самого приложения при его нормальном режиме работы. Для предотвращения угроз будут использоваться как программные меры, так и организационные, которые могут быть выделены в отдельную методику [2].

Соответствующая математическая постановка задачи оперирует следующими исходными данными:

$A_1 = \{a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n_1}\}$ – множество возможных угроз среде функционирования приложения со стороны операционной системы с соответствующими индексами $N_1 = \{1, 2, \dots, n_1\}$.

$A_2 = \{a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2n_2}\}$ – множество возможных угроз, возникающих при эксплуатации уязвимостей приложения в процессе работы с ним, с соответствующими индексами $N_2 = \{1, 2, \dots, n_2\}$.

$A = A_1 \cup A_2 = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ – множество всех возможных угроз безопасности системы в целом от всех источников с соответствующими индексами $N = N_1 \cup N_2 = \{1, 2, \dots, n\}$, $n = n_1 + n_2$.

$A_0 = \{a_{01}, a_{02}, \dots, a_{0n_0}\}$ – множество угроз, которые обязательно должны быть предотвращены любым способом, несмотря на стоимость, для нормального функционирования приложения, с соответствующими индексами $N_0 = \{1, 2, \dots, n_0\}$, $A_0 \subseteq A$, $N_0 \subseteq N$, $n_0 \leq n$. Таковыми на данном этапе являются угрозы наличия Root-доступа, декомпиляции приложения, несанкционированного доступа к защищенным пользовательским данным.

$B_1 = \{b_{11}, b_{12}, \dots, b_{1m_1}\}$ – множество мер и средств защиты от угроз среде функционирования приложения со стороны операционной системы с соответствующими индексами $M_1 = \{1, 2, \dots, m_1\}$. Данные меры будут в основном являться организационными.

$B_2 = \{b_{21}, b_{22}, \dots, b_{2m_2}\}$ – множество мер и средств защиты от угроз, возникающих при эксплуатации уязвимостей приложения в процессе работы с ним, с соответствующими индексами $M_2 = \{1, 2, \dots, m_2\}$. Данные меры будут в основном являться программными.

$B = B_1 \cup B_2 = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$ – множество всех возможных мер и средств защиты от угроз безопасности системы в целом от всех источников с соответствующими индексами $M = M_1 \cup M_2 = \{1, 2, \dots, m\}$, $m = m_1 + m_2$.

$B_0 = \{b_{01}, b_{02}, \dots, b_{0m_0}\}$ – множество мер и средств защиты от угроз, которые обязательно должны быть предотвращены любым способом, несмотря на стоимость, для нормального функционирования приложения, с соответствующими индексами $M_0 = \{1, 2, \dots, m_0\}$, $B_0 \subseteq B$, $M_0 \subseteq M$, $m_0 \leq m$, $m_0 \leq n_0$. Таковыми на данном этапе являются меры и средства по предотвращению соответствующих угроз из A_0 : проверка на нали-

чие Root-доступа, обфускация приложения при сборке.

$C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ – множество стоимостей исполнения j -го средства или меры защиты от угроз безопасности системы в целом, $j \in M$.

$C_0 = \{c_{01}, c_{02}, \dots, c_{0m_0}\}$ – множество стоимостей мер и средств защиты от угроз, которые обязательно следует предотвратить любым способом для нормального функционирования приложения. Соответствует мерам из B_0 . $C_0 \subseteq C$. Предполагаемая длительность эксплуатации системы обозначается периодом времени $T = [t_0, t_{\max}]$. На соответствующем интервале времени T вероятность проявления i -й угрозы обозначается как p_i , где $p_i \in [0,1] \forall i \in N$ (определяется по данным статистики или с использованием экспертных оценок). При этом ожидается обязательное проявление угроз из множества A_0 : $p_k = 1 \forall k \in N_0$.

Предотвращенный ущерб от возможной реализации i -й угрозы безопасности системы обозначается u_i , где $u_i \geq 0 \forall i \in N$.

$v_{ij}, \forall i \in N, \forall j \in M, v_{ij} \in [0,1]$ – вероятность предотвращения реализации i -й угрозы безопасности системы при использовании j -го средства или меры защиты (определяется по данным статистики или с использованием экспертных оценок). При этом $v_{ij} \rightarrow 1, \forall i \in N_0, \forall j \in M_0$. Вероятность предотвращения реализации обязательных угроз должна стремиться к единице.

Затраты на обеспечение защиты не должны превышать некий установленный, например, заказчиком порог: C_{\max} . При этом стоит учитывать, что затраты на предотвращение обязательных угроз также составляют это значение [3].

На этапе разработки можно предусмотреть большое количество различных мер и средств обеспечения безопасности. Но не все из этих средств надлежит использовать при эксплуатации приложения: некоторые из-за высокой стоимости исполнения, некоторые из-за недостаточной эффективности предотвращения соответствующей угрозы. В итоге возникает ситуация, когда мера описана, но не используется. Для оценки показателя эффективности выбора используемых средств и мер защиты системы от угроз безопасности используется множество $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\} \forall j \in M, x_j \in \{0,1\}$, где $x_j = 1$, если j -е средство или мера защиты будет применяться

в системе для защиты от реализации некоторой угрозы безопасности; $x_j = 0$, если не применяется. Очевидно, что $x_k = 1 \forall k \in M_0$

Подытоживая вышеописанные ограничения, можно сформулировать итоговую математическую постановку задачи проектирования и разработки информационной системы управления показателями защищенности сервиса для обмена сообщениями, которая описывает эффективность выбора средств и мер защиты от угроз безопасности системы в целом и демонстрирует средний возможный предотвращенный ущерб:

$$\begin{cases} R(X) = \sum_{i=1}^n p_i u_i \max_{j \in M} (v_{ij} x_j) \rightarrow \max_X \\ \sum_{j=1}^m c_j x_j \leq C_{\max} \end{cases}$$

где $R(X)$ – суммарный предотвращенный ущерб от реализации угроз при использовании соответствующих мер или средств защиты. Этот показатель полагается максимизировать [4].

Поскольку множество X можно интерпретировать как вектор булевых переменных, то поставленная задача является задачей булева программирования. Ее решением будет являться нахождение всех неизвестных компонент этого вектора и выбор тех средств и мер защиты $b_j \in B$, для которых j -я компонента $x_j, \forall j \in M$ равна 1. Для решения поставленной задачи необходимо рассмотреть основные угрозы безопасности приложения и пользовательских данных, включая обязательные для предотвращения угрозы из множества A_0 , а также соответствующие им меры и средства защиты для обеспечения противодействия.

Литература

1. Цирлов В.Л. Теоретические основы информационной безопасности автоматизированных систем / В.Л. Цирлов. – М.: Феникс, 2008. – 173с.
2. Android for developers. – Режим доступа: <https://developer.android.com>. – Дата доступа 25.09.2020.
3. Android security for developers – Режим доступа: <https://source.android.com/security>. – Дата доступа: 23.09.2020.
4. Android vulnerabilities – Режим доступа: <https://www.androidvulnerabilities.com>. – Дата доступа: 27.09.2020.

УДК 336

МОДИФИЦИРОВАННАЯ ОПТИМАЛЬНАЯ ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ «УМНОГО ГОРОДА»

Мелюшин П.В., Афанасенко А.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Целью создания «умного города» является повышение уровня жизни населения за счет использования технологий городских информационных систем для повышения эффективности услуг и удовлетворения потребностей потребителей услуг. ИКТ позволяют городским властям более тесно сотрудничать с сообществами, управлять городской инфраструктурой и контролировать развитие города. Использование устройств, работающих в режиме реального времени, позволяет обрабатывать и анализировать поступающую информацию с целью повышения эффективности муниципального управления. ИКТ дают возможность улучшить качество услуг, повысить продуктивность городских услуг, снизить затраты при использовании материальных и финансовых ресурсов, улучшить связь между городскими жителями и государственными органами в городе. Технологии «умного города» направлены на повышение качества управления городскими структурами и улучшение реакции на решение сложных проблем.

Отрасли, которые улучшают технологии умного города, включают государственные услуги, управление сетью городского транспорта, управление энергопотреблением, здравоохранение, управление водными ресурсами, инновационное сельское хозяйство и управление отходами. Используемая технология индикатора истинного прогресса GPI рассматривает домашние хозяйства как основную единицу благосостояния нации и, таким образом, начинает свою учетную деятельность с личных расходов на потребление. С этой целью GPI добавляет льготы, связанные с социальной деятельностью, такой как воспитание детей, работа по дому, высшее образование, а также услуги, предоставляемые домашними хозяйствами, капиталом и общественной инфраструктурой. Затем GPI вычитает затраты, связанные с загрязнением окружающей среды, потерей свободного времени, и добавляет прибыль от международной торговли.

В технологии GPI предполагается, что объем экономической деятельности как таковой не имеет большого значения для оценки ее вклада в благосостояние без информации о ее качестве.

Формула расчета следующая:

$$GPI = A + B - C - D + I, \quad (1)$$

где А – потребительские расходы с поправкой на распределение доходов; В – стоимость нерыночных услуг, увеличивающих благосостояние;

С – индивидуальные затраты на защиту от деградации окружающей среды; D – цена деградации общества, окружающей среды и истощения невозобновляемых ресурсов; I – увеличение капитала и сальдо международной торговли.

Критерий целевого состояния городского конгломерата определяется линейной суммой 26 показателей (GPI).

Математическая оптимизационная модель формулируется: для заданного интервала минимального X_{\min} и максимального X_{\max} для 26 показателей GPI определить общие затраты, обеспечивающие максимальное благосостояние.

$$Z = \sum_{i=1}^{26} X_i \rightarrow \text{максимум}, \quad (2)$$

$$Z = \sum_{i=1}^{26} A_{ij} * X_i < R_j \quad (3)$$

где X – объем услуг 26 показателей; A_{ij} – доля потребления j-го ресурса для роста i-го вида услуги; R_j – j-й ресурс, которым распоряжается город.

Анализируются три класса ограничений R_j для городского конгломерата:

– Ограничения ресурсов – связанные с ограниченными доступными материальными, финансовыми, кадровыми и другими ресурсами городского конгломерата.

– Ограничения, связанные с недопустимостью ухудшения динамики других показателей, в результате выполнения принятых решений.

– Внешние ограничения из-за социальных, экономических, политических факторов, которые возникают вне сферы управления, но прямо или косвенно влияют на нее. Взаимосвязь действия объективных экономических тенденций в модели является инструментом для анализа проблем, связанных с будущим влиянием на текущее благосостояние городского конгломерата, которого желательно достичь к определенной дате.

Составляющие целевой функции, влияющие на благополучие

1. Составляющие потребительских расходов

X1 – Индивидуальные потребительские расходы. Стоимость рассчитывается путем умножения дохода на душу населения на отношение потребительских расходов к доходу.

X2 – Распределение дохода (коэффициент Джини отражает разницу между фактическим

распределением дохода и равным распределением).

X3 – Потребление с поправкой на распределение доходов. Расчет производится – $X1/X2 \cdot 100$.

2. Компоненты стоимости нерыночных услуг, увеличивающих благосостояние

X4 – Стоимость домашнего труда. Количество часов работы \times почасовая оплата за наем сотрудника для выполнения этой работы.

X5 – Стоимость волонтерского труда. Количество часов волонтерской работы \times почасовая оплата за наем сотрудника для выполнения этой работы.

X6 – Использование внутреннего капитала. Цена существующих товаров длительного пользования \times норма амортизации 12,5 %.

X7 – Стоимость товаров длительного пользования. Доход на душу населения \times процент расходов на товары длительного пользования.

X8 – Использование дорог и улиц. Стоимость существующих дорог \times 7,5 %.

3. Составляющие индивидуальных затрат защиты от ухудшения состояния окружающей среды

X16 – Затраты на загрязнение домохозяйствами. Цена фильтров и преобразователей + цена канализации + стоимость утилизации отходов.

4. Компоненты цены деградации окружающей среды и истощения невозобновляемых ресурсов

X11 – Цена преступления. Прямой ущерб от имущественных преступлений + расходы на предупреждение преступности.

X12 – Цена разводов. Прямой ущерб от разводов + социальная стоимость потерь.

X13 – Уменьшение досуга. Уровень занятости \times потерянное свободное время \times средняя почасовая оплата.

X14 – Цена безработицы. Количество безработных \times количество незарегистрированных часов \times средняя почасовая оплата.

X15 – Цена ежедневного проезда. Цена автомобиля \times процент использования его для ежедневных поездок + стоимость использования общественного транспорта + стоимость времени на ежедневные поездки с местной почасовой оплатой.

X17 – Цена ДТП. Количество несчастных случаев \times цена одной аварии.

X18 – Цена загрязнения воды. Ущерб качеству воды – прямая потеря для общественного благосостояния. Процент ухудшения качества воды \times выигрыш от использования качественной воды.

X19 – Цена загрязнения воздуха. Данные о загрязнении \times цена за единицу загрязнения.

X20 – Цена шумового загрязнения. Индекс урбанизации \times цена шумового загрязнения по оценке ВОЗ.

X21 – Утрата водно-болотных угодий. Общие потери водно-болотных угодий \times стоимость гектара.

X22 – Потеря сельскохозяйственных земель. Потеря сельскохозяйственных угодий \times смета затрат на гектар.

X23 – Истощение невозобновляемых ресурсов. Потребление невозобновляемых ресурсов \times стоимость замещения возобновляемых ресурсов.

X24 – Долгосрочный ущерб окружающей среде. Энергопотребление \times прирост социальных затрат на выбросы CO₂ за данный год.

X25 – Разрушение озонового слоя. Выбросы озоноразрушающих веществ \times цена за килограмм.

X26 – Уменьшение лесного покрова. Площадь потерянных лесов \times цена за гектар.

5. Увеличение капитала и сальдо международной торговли

X9 – Общие вложения в капитал. Учет изменения накопленного капитала на 1 работника. Данные национальной статистики.

X10 – Общий внешний долг/займы. Устойчивость экономики зависит от степени ее зависимости от внешних источников финансирования для поддержания текущего потребления.

УДК 336

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ И СОЗДАНИЯ НОВОЙ ПРОДУКЦИИ В КОМПАНИИ APPLE

Мелюшин П.В., Афанасенко А.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Согласно философии Apple, продукты начинаются с дизайна. Дизайнер излагает свою концепцию, которая для остальных является руководством к действию. Везде производственный отдел диктует свою волю дизайнерскому, в Apple – наоборот.

Как только в дизайнерском отделе начинается работа, подключаются другие подразделения; два из них – снабженцы и инженеры – отвечают за конечный продукт. Начинается процесс создания новинок Apple – Apple New Product Process, или ANPP. Такое название носит поша-

говая инструкция для внутреннего пользования. Цель ANPP – идеально отладить научную составляющую.

Перед тем как готовый продукт покинет стены лаборатории, инициативу берут два человека – главный инженер и главный логист. Несмотря на то, что место работы инженеров и логистов – офис в Купертино, большую часть времени они проводят в Китае, где на контрактной основе корпорация производит свои компьютеры и мобильные устройства. Тем самым Apple выбирает самый затратный путь: проектирует продукт в офисе, а затем производит и тестирует опытный образец на заводе-изготовителе.

Чтобы добиться нужного результата, зачастую приходится воспроизводить всю цепочку несколько раз: снова разрабатывать, изготавливать и тестировать продукт. В Apple существует «открытый цикл»: каждые 4–6 недель на китайской фабрике встречаются основные участники проекта для принятия важных решений по дизайну и техническому оснащению.

Принцип ANPP, воплощен в компьютерной программе, в которой подробно расписано, что каждый сотрудник должен делать на каждой стадии. Инструкции есть для всех подразделений, начиная с отдела аппаратного обеспечения и заканчивая программистами, операционным, финансовым и маркетинговым отделами и техподдержкой. С самого начала ANPP вовлекает в процесс отделы, работа которых видна только после запуска продукта, например, маркетинг. В Apple о потребностях клиента и конкурентоспособности думают сразу, как только начинается работа над продуктом. Другим источником ANPP была система «комплексного проектирования», благодаря которой отделы могут работать параллельно, в отличие от старой – последовательной – схемы.

Команда Quality Assurance состоит из примерно ста человек. В работе используется рабочее обсуждение, которые называются Bug Review Board (BRB), на которых инженеры рассказывают о текущем прогрессе с поиском дефектов и контроле этот процесс с помощью графика burndown. Во время обсуждения неис-

правленные дефекты ранжируются по приоритетам от P1 до P3.

В компании Apple больше полагаются на людей, тестирующих продукты вручную. Тем не менее, автоматические тесты для iPhone используются.

Bug bounty – это программа по поощрению людей, обнаруживших уязвимость в продуктах и сообщивших о ней. Кроме того, инженеры тесно сотрудничают с FreeBSD Security Team.

В Apple есть как команды для ручного тестирования, так и автоматического. Каждая продуктовая команда имеет свою отдельную команду тестировщиков.

Radar – это внутренняя система для работы с дефектами, доступ к которой возможен на основе веб-приложения RadarWeb, приложения для iPad и iPhone – MobileRadar, и Radar for OS X. Сторонние разработчики имеют доступ к Radar только через RadarWeb с ограниченной функциональностью, в то время как сотрудники Apple имеют доступ к Radar с помощью приложения для iOS, Radar для OS X.

Ключевые особенности разработки продуктов в Apple:

- ключевая роль отдела дизайнеров;
- найденные дефекты моментально появляются в баг-трекере;
- процесс разработки строго определен чек-листом (ANPP);
- за производство и финальное тестирование опытных образцов отвечают главный инженер и главный логист, наделенные практически безграничными полномочиями;
- бета-тестирование продуктов;
- тестирование опытных образцов продукта в обычных условиях сотрудниками Apple;
- использование принципа "eating your own dog food";
- программы bug bounty;
- коллективное обсуждение критичности найденных дефектов;
- активное использование ручного тестирования;
- разработка ведётся трёхнедельными спринтами: две недели разработка новой функциональности и одна неделя багфиксинг.

УДК 614.842

НЕОЧЕВИДНЫЕ РЕШЕНИЯ РАСЧЕТА ПОТОКОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭВАКУАЦИЕЙ ЛЮДЕЙ ПРИ ПОЖАРЕ

Мисюкевич Н.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Методика расчета параметров эвакуации при движении людских потоков приведена в приложении 2 ГОСТ 12.1.004-91 [1]. В тоже время, ряд

необходимых параметров расчета отсутствует, а сама методика трудно применима для непосвященного в виду непоследовательности изложе-

ния и отсутствия логических пояснений. В публикации изложены основные данные для ее применения при практических расчетах.

Критерием безопасности эвакуации является соблюдения соотношения

$$t_p \leq t_n - t_c, \quad (1)$$

где t_p – расчетное время эвакуации; t_n – необходимое время эвакуации; t_c – время свободного развития пожара до начала эвакуации.

Плотность потока D , отражающая количество людей на участке эвакуации, по ГОСТ 12.1.004-91 [1], измеряется в $\text{м}^2/\text{м}^2$. Такое изложение вызывает справедливую критику, так как показатель оказывается безразмерным и его следует назвать коэффициентом плотности. При этом становится логичным изложение и размерность других величин для расчета движения людского потока: и скорость v , и интенсивность движения q измеряются в м/мин. Взаимозависимость указанных величин можно выразить равенством

$$q = Dv. \quad (2)$$

В помещениях с массовым пребыванием людей на путях эвакуации, как правило, возникает превышение максимально возможной плотности потока: коэффициент плотности при расчете получается 0,9 и более. Возникает задержка эвакуации при движении по общим проходам или/и в дверях. Однако, приложение 2 [1] не содержит формулы для расчета параметров эвакуации в такой ситуации. Учитывая, что движение возможно при коэффициенте плотности не выше 0,9, время задержки эвакуации t_s можно определить, используя значение интенсивности движения при максимальной возможной плотности по формуле

$$t_s = \frac{Nf}{0,9q_i\delta_i} \quad (3)$$

где N – количество людей, не успевающих пройти без задержки, чел; f – площадь горизонтальной проекции человека, м^2 ; q_i – интенсивность движения, м/мин; δ_i – ширина пути эвакуации, м.

Процесс движения потока из помещений с массовым пребыванием людей можно представить в виде двух составных частей. Определенное количество людей движется с докритической плотностью и время их движения t_{0e} определяется по формулам приложения 2 [1]. Движение остальных людей не может быть определено по приложению 2 [1] в виду задержки эвакуации и расчетное время эвакуации из помещения увеличивается на время задержки эвакуации t_s по формуле (3). При этом расчетное время эвакуации из помещения определяется по формуле

$$t_p = t_{0e} + t_s \quad (4)$$

При определении расчетного времени эвакуации из помещений с массовым пребыванием людей задержка эвакуации может возникать как на общих проходах, так и в дверях при выходе из помещений. Для сокращения объема расчета важно определить места задержки эвакуации, которые наиболее критичны, в которых происходит задержка эвакуации наибольшего количества людей. При определении времени задержки эвакуации учитывается задержка эвакуации только в этих местах.

Расчет движения людского потока начинается от наиболее удаленного от выхода из помещения участка. К примеру, в поточной аудитории с одинаковым количеством мест в рядах движение начинается из последнего ряда. При движении к проходу определяется коэффициент плотности потока D . Исходя из полученного значения по таблице 2 приложения 2 [1] методом линейной интерполяции определяются интенсивность движения q и скорость движения v . Исходя из скорости движения определяется время движения всех людей по участку, которое соответствует времени выхода последнего человека с данного участка при его нахождении в начале движения в наиболее удаленной точке. Параметры D , q , v будут характерны для любого ряда в данной аудитории. Коэффициент плотности потока D далее в расчетах не определяется, все расчеты проводятся исходя из изменяющейся интенсивности движения потока q на последующих участках. По изменившейся интенсивности q определяют методом линейной интерполяции скорость движения v на последующих участках. Для каждого участка определяют время движения по формуле (7) приложения 2 [1]. При движении по проходу от последнего ряда до предпоследнего интенсивность q определяют по формуле (9) приложения 2 [1] и далее по формуле (12) приложения 2 [1]. При неизменяемой ширине прохода (лестницы) интенсивность q при движении от ряда к ряду будет увеличиваться на одну и ту же величину и превысит максимально допустимую.

Превышение значением интенсивности q максимального значения по таблице 2 приложения 2 [1] означает задержку эвакуации людского потока. Рассматривать движение можно только для людей, которые сформировали поток на докритической интенсивности. Именно это количество людей из рядов рассматривается в дальнейшем как движение потока. Естественно, что без задержки будут двигаться люди не из последних рядов, а изначальных. Так как все ряды формируют одинаковую характеристику людского потока, то рассматривается в дальнейшем движение людского потока на докритической плотности от первого ряда до выхода из помещения.

Если выход из помещения (дверной проем) позволяет людскому потоку пройти без задерж-

ки, то время прохождения потоком является временем движения $t_{об}$ без учета задержки эвакуации. Время задержки потока в проходе t_z суммируется с временем движения для определения расчетного времени эвакуации из помещения, формула (4). Если выход из помещения (дверной проем) не позволяет людскому потоку пройти без задержки, то необходимо определить количество рядов, люди из которых создадут поток, проходящий через дверной проем без задержки. Это осуществляется путем расчета движения для последовательного уменьшенного на один ряд потока. Критической является задержка в дверном проеме. Именно время задержки в дверном проеме учитывается как время задержки эвакуации t_z .

При использовании формулы (3) необходимо учесть, что значение интенсивности движения потока q_i , которое применяется в формуле (3) принимается из последней строчки таблицы 2 приложения 2 [1] для соответствующего пути движения. Это соответствует наиболее неблагоприятной ситуации, когда коэффициент плотности потока составляет 0,9.

Расчет помещений с массовым пребыванием людей с несколькими общими проходами имеет некоторые особенности, которые следует учитывать для получения примерно одинаковой интенсивности движения во всех проходах между рядами. При наличии проходов около стен и в середине помещения попытка смоделировать движение с каждого ряда ко всем проходам одновременно, как правила, обречена на неудачу, так как интенсивность движения около стен окажется существенно ниже, чем интенсивность движения по проходу в середине помещения. Это вытекает из применения формулы 12 приложения 2 [1]. При одинаковой ширине проходов суммирование однотипных потоков с двух

направлений в проходе в середине помещения ведет к удвоению интенсивности. Адекватную картину движения людей можно получить при направлении людей к проходу только с одной стороны, что для прохода в середине помещения решается путем поочередного (от ряда к ряду) изменения направления движения людей (то слева, то справа). При этом соответствующим образом (от ряда к ряду) меняется и количество людей, направляющихся к проходам вдоль стен. Такая схема движения позволяет смоделировать потоки в проходах примерно равной интенсивности и, соответственно, движущиеся с примерно равными скоростями.

При расчете движения людских потоков по общим путям эвакуации следует учитывать, что расчетное время выхода людей из помещения является временем выхода последнего человека из данного помещения. Для случая одного человека это означает, что он находился в наиболее удаленной точке. Время выхода первого человека принимается равным нулю (находился у выхода). Поэтому вопрос возможности слияния потоков из разных помещений рассматривается в контексте следующей позиции: «Успел ли последний человек выйти из помещения до того, как к этому помещению подошел первый человек из соседнего помещения?».

Превышение максимально возможной плотности потока на общих путях эвакуации недопустимо. Безопасность людей обеспечивается разделением объекта на зоны и одновременностью оповещения зон.

Литература

1. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования: ГОСТ 12.1.004-91. – Минск: Госстандарт, 2008. 65 с.

УДК 621.396.6

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В МЕГАПОЛИСЕ

Плытник Е.А., Савёлов И.Н.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Деятельность человека, возведенные сооружения в городах приводят к искажению измерений параметров окружающей среды, поэтому метеорологические и климатические станции наблюдений, как правило, располагают за пределами городской среды. Тем не менее, требуется развитие специализированных сетей, характеризующихся высокой плотностью наблюдений, с тем чтобы предоставлять информацию о состоянии окружающей среды для метеорологического и климатического прогнозирования и оперативного реагирования на её изменение.

Для обеспечения согласованных, интегрированных и плотных наблюдений в городских районах также могут использоваться новые и перспективные технологии. Сбор данных методом краудсорсинга и сети мобильных датчиков, встроенных в сотовые телефоны или автомобили, например, могут предоставить экономичные и гибкие решения в дополнение к более традиционным источникам наблюдений [1].

Для осуществления контроля параметров окружающей среды в мегаполисах перспективным, по нашему мнению, является использование

сети устройств с открытой архитектурой выполняющих измерение и фиксацию измеренных величин с последующей передачей собранных данных по беспроводным интерфейсам связи для последующей обработки.

Структурная схема системы мониторинга окружающей среды представлена на рисунке 1.

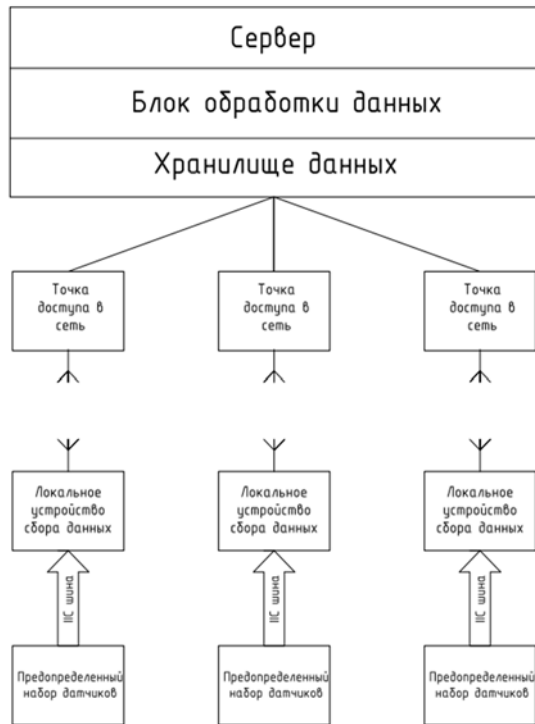


Рисунок 1 – Структурная схема системы мониторинга параметров окружающей среды в мегаполисе

Нами была разработана конструкция локального устройства сбора данных с открытой архитектурой [2]. Автономный прибор (рисунок 2) позволяет производить опрос до 127 различных датчиков, подключенных к общей ИС шине данных. Применение данного устройства обеспечит формирование комбинации датчиков, измеряющих определённые интересные величины в каждой конкретной локации мегаполиса. Локальное устройство сбора данных с заданным интервалом производит опрос датчиков, подключенных к шине данных и сохраняет полученные результаты в энергонезависимую память. При подключении к точке доступа в сеть устройство формирует пакет данных и передает его на сервер посредством сети Интернет. При подтверждении получения данных энергонезависимая память устройства очищается.

Переданные на сервер показания измерений помещаются в хранилище данных с присвоением индекса локального устройства, временной и географической отметок.

В качестве интерфейсов связи, в зависимости от расположения устройства сбора данных могут использоваться:

1. Wi-Fi(IEEE 802.11);
2. WiMax;
3. Мобильная телефония(2G, 3G, 4G, 5G);
4. Bluetooth;
5. Проводные интерфейсы связи (Ethernet, RS-232).

Блок обработки данных обеспечивает визуальное представление динамики измерений величин для каждого устройства сбора данных и статистику и тенденцию изменений выбранного параметра в выбранной географической зоне на карте.

Для обработки большого объёма собранных данных целесообразным является применение искусственных нейронных сетей [3]. Их использование позволит выполнить поиск величин, обладающих корреляционной зависимостью, что позволит сократить количество измеряемых величин. Значения таких параметров могут быть вычислены на основе граничных значений параметров, также выполняется нормализация (приведение значения к единице) измеренных величин. На рисунке 3 представлены графики измеренных значений температуры объекта и значений, вычисленных нейросетью на основании коррелирующих данных. Нормализованные значения передаются в программный блок нейросети для её «обучения» или расчёта итересующей величины.

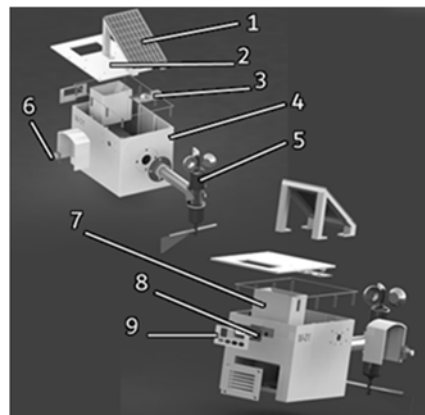


Рисунок 2 – Твёрдотельная модель локального устройства сбора данных:

- 1 – солнечная панель; 2 – крышка; 3 – печатная плата;
- 4 – корпус, 5 – анемометр; 6 – веб-камера;
- 7 – измеритель уровня осадков; 8 – дисплей; 9 – панель управления

Программная или аппаратная реализация биологической нейронной сети, способна «обучаться» на основании полученных данных. Искусственный нейрон, являющийся базовым объектом, составляющим нейронную сеть, воспроизводит поведение биологического нейрона: имеет набор входных каналов и, в зависимости от входных данных, предоставляет выходное значение. Кроме того, нейрон имеет возможность варьировать веса входных каналов в соответствии с их приорите-

том. Искусственный нейрон также характеризуется функцией активации, которая применяется к сумме входных значений. В большинстве случаев результатом функции активации является дискретное значение: как правило «0» или «1».

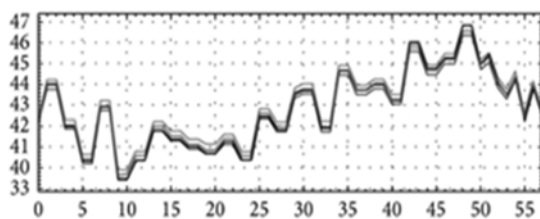


Рисунок 3 – Графики измеренных и вычисленных значений

Обычно, искусственная нейронная сеть состоит из некоторого количества искусственных нейронов, объединенных в связанные между собой слои. Использование нейронных сетей позволяет идентифицировать корреляцию между величинами без использования сложных математических методов.

Основными функциональными применениями нейронных сетей являются: классификация входных данных; определение принадлежности исследуемого объекта к одному из заранее определенных классов, кластеризация; разбиение массива данных на заранее неизвестное количество классов, прогнозирование: предсказание будущего значения некоторой последовательности на основании предыдущих и текущих значений определенных факторов и аппроксимация непрерывных функций;

Обучение искусственной нейронной сети такого типа происходит на основании готового набора входных значений и соответствующего им выходного. Для этого применяются две функции: функция оценки потерь, вычисляющая точность выходного значения; и функция оптимизации параметров нейросети, которая на основании результата функции оценки потерь изменяет конфигурацию модели. Обучение считается завершенным, когда результат функции оценки потерь достигает минимального значения, после чего нейросеть тестируется на новых данных, не использованных при обучении для оценки работоспособности.

Для решения задачи определения неизвестной величины, коррелирующей с измеряемыми значениями подходит нейронная сеть прямого распространения. Для использования такой нейросети требуется предварительная подготовка данных, заключающаяся в нормализации входных

значений. Как правило входные значения приводятся к единице.

Для реализации данной нейросети предполагается использование фреймворка PyTorch, предоставляющего возможности использования инструментов, предназначенных для проектирования, обучения и использования различных типов нейронных сетей. Фреймворк позволяет построить нейронную сеть прямого распространения с двумя скрытыми линейными слоями с произвольным количеством нейронов. Входной слой представляет собой слой с количеством нейронов, равным количеству входных нормализованных значений. Выходной слой – это единственный нейрон со значением, рассчитанным нейросетью.

Для оценки потерь выбрана функция $L1Loss()$ [4], вычисляющая среднее абсолютное значение разности между величиной, вычисленной нейросетью и ожидаемым значением.

В качестве функции оптимизации параметров нейросети выбрана функция $optim.SGD()$ [5], применяющая к весам нейросети стохастический градиентный спуск, основанный на величине результата функции оценки потерь, с задаваемым моментом для преодоления локальных минимумов.

Поскольку входные данные нормализованы и приведены к единице, выбрана функция активации – «гиперболический тангенс». Такой принцип позволяет как производить поиск коррелирующих друг с другом значений параметров окружающей среды, так и использовать натренированные нейронные сети для расчета искомым величин в реальном времени.

Таким образом, в результате выполнения работы разработана схема организации системы мониторинга окружающей среды в мегаполисе на основе нейронных сети.

Литература

1. Наблюдение и мониторинг городов. – Режим доступа: <https://public.wmo.int/ru>. – Дата доступа: 07.10.2020.
2. Плытник Е.А. Автономная цифровая метеостанция / Е.А. Плытник, И.Н. Савёлов. – Сборник статей лауреатов и авторов научных работ, получивших первую категорию (НИРС-2019), 155 с.
3. Forecasting Cell Temperature of PV Modules with Adaptive System. – Режим доступа: <https://www.hindawi.com/journals/ijp/2013/192854/>. Дата доступа: 15.09.2020.
4. L1LOSS. – Режим доступа: <https://pytorch.org/docs/stable/generated/torch.nn.L1Loss.html>. – Дата доступа 06.10.2020.
5. TORCH.OPTIM. – Режим доступа: <https://pytorch.org/docs/stable/optim.html>. – Дата доступа: 06.10.2020.

МЕТОДЫ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ

Тявловский А.К.¹, Поводайко А.Д.¹, Жарин А.Л.¹, Воробей Р.И.¹, Гусев О.К.¹, Колтунович Т.², Пантелеев К.В.¹

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²Люблинский технический университет
Люблин, Польша

Измерения контактной разности потенциалов (КРП) и работы выхода электрона (РВЭ) методами зондовой электрометрии характеризуются относительно низким отношением сигнал / шум, что остро ставит проблему фильтрации измерительного сигнала. Улучшить отношение сигнал / шум можно за счет использования в качестве измерительного преобразователя цифрового зонда Кельвина [1], работающего в режиме большого сигнала, однако такой режим практически исключает использование классических аналоговых фильтров, поскольку выходной сигнал измерительного преобразователя представляется в форме динамического числового массива, т.е. дискретной последовательности цифровых отсчетов, поступающих с постоянными интервалами в реальном масштабе времени.

Такой динамический массив может быть обработан в режиме реального времени средствами цифровой обработки микропроцессора для дополнительного подавления шумов и паразитных гармоник сигнала, а также для статистического вычисления амплитуды сигнала, что позволяет существенно повысить точность определения параметров компенсационной зависимости цифрового зонда Кельвина и, соответственно, точность измерения КРП или РВЭ

Поток информации с выхода измерительного преобразователя можно представить суммой детерминированной (или квазидетерминированной) $Y_d(t)$ и стохастической (случайной) $Y_c(t)$ составляющих:

$$Y(t) = Y_d(t) + Y_c(t) \quad (1)$$

Цифровая фильтрация направлена на устранение стохастической составляющей, что достигается путем выполнения математических операций с оцифрованными данными. Одним из наиболее простых примеров цифрового фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтра) является фильтр скользящего среднего, в котором на отфильтрованное значение влияет только h последних отсчетов:

$$y_k = \frac{1}{h} \sum_{i=l}^k x_i \quad (2)$$

где x_i – исходные значения рассматриваемой функции; $h=k-l$ – сглаживающий интервал – ко-

личество значений исходной функции для расчета скользящего среднего.

Схематически КИХ-фильтр может быть представлен графом потока сигналов, вид которого показан на рисунке 1.

На рисунке 2 приведен результат применения данного фильтра к реальному измерительному сигналу. Чем шире сглаживающий интервал, тем более плавным будет график результирующей функции. С другой стороны, увеличение сглаживающего интервала приводит к временному сдвигу усредненной функции относительно исходной.

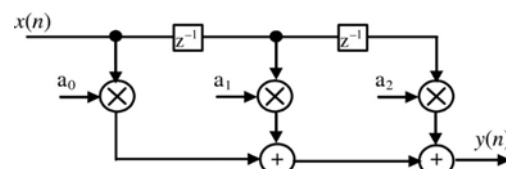


Рисунок 1 – Граф потока сигналов КИХ-фильтра

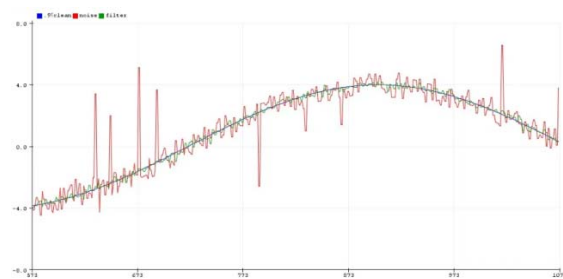


Рисунок 2 – Результат применения фильтра скользящего среднего к сигналу, содержащему шум и случайные выбросы

Основным недостатком КИХ-фильтров является большое количество отводов, необходимых для реализации некоторых аспектов частотной характеристики, а именно резкого обрезания [2]. Фильтры с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтры) помимо входных используют также предыдущие выходные значения функции:

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i x(n-i) + \sum_{j=1}^{M-1} b_j y(n-j) \quad (3)$$

Примером БИХ-фильтра первого порядка является экспоненциальный фильтр, описываемый выражением

$$y_k = y_{k-1} + \theta(x_k - y_{k-1}), \quad (4)$$

где x_k – измеренное значение в момент времени k ; y_k – фильтрованное значение в момент времени k ; θ – коэффициент фильтрации (от 0 до 1).

Результат применения экспоненциального фильтра представлен на рисунке 3. Данный фильтр схож с фильтром скользящего среднего, но имеет несколько преимуществ: 1) простота вычисления; 2) не требуется хранить в памяти микроконтроллера несколько предыдущих значений; 3) хорошо подавляет резкие скачки в измерениях; 4) довольно быстро приближается к значениям после скачка. С другой стороны, этот фильтр имеет довольно большую задержку.

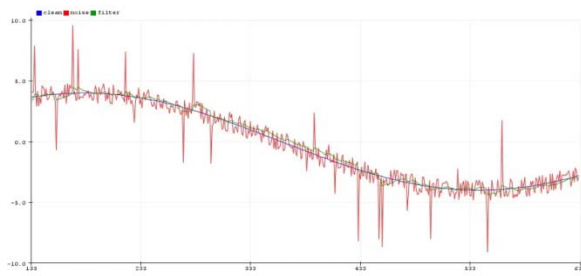


Рисунок 3 – Результат применения экспоненциального фильтра

Для фильтрации импульсных помех (выбросов) наиболее эффективен медианный фильтр. Данный фильтр использует массив из N последних значений, которые отсортированы по возрастанию. Значение, расположенное в середине отсортированного списка, присваивается выходному сигналу. Последний в этом случае также формируется с задержкой.

Практика проектирования показала, что наилучшего результата при обработке сигнала зондового электрометрического преобразователя, характеризующегося относительно малой шириной спектра полезного сигнала и низким отношением сигнал / шум, можно достигнуть при сочетании нескольких фильтров. Программная реализация описанных фильтров создавалась в среде разработки *Arduino IDE*. Для простого фильтра скользящего среднего использовалась временная переменная *sum*, предназначенная для накопления суммы отсчетов, с последующим ее делением на количество накопленных отсчетов. Размер выборки задается функцией *NUM_READ*. Увеличение размера выборки улучшает качество фильтрации. Практика показала, что такой фильтр целесообразно использовать в ситуации, при которой источник первичного сигнала опрашивается редко, время его опроса невелико и много меньше времени изменения сигнала, а результирующее время выборки не влияет на работу основной программы.

Более универсальным оказалось решение, основанное на формировании глобального или статического *static float valArray[NUM_READ]* массива. При поступлении нового отсчета сигнала весь массив сдвигается влево и в самую последнюю ячейку записывается новое значение *valArray[NUM_READ - 1] = newVal*. После этого массив суммируется, и сумма делится на количество ячеек. Данный способ одновременно хорош и плох тем, что создает некоторое запаздывание среднего значения, причем чем больше окно усреднения, т.е. размер выборки, тем эффективнее будет усредняться сигнал, но тем выше задержка относительно реального времени.

Данный недостаток может быть устранен введением кольцевого буфера *static int vals[NUM_READ]*, который может использоваться без сдвига. Для внесения нового отсчета в массив используется переменная, которая хранит текущее положение отсчета в массиве. Вместо полного суммирования массива используется переменная суммы, к которой при каждом вызове фильтра прибавляется новое значение *average += newVal* и вычитается самое старое *average -= vals[t]*. Благодаря этому количество операций сложения не зависит от размера буфера и всегда составляет 2. Этим обеспечивается высокое быстродействие при большой величине выборки.

Для фильтра экспоненциального среднего была создана оригинальная программная реализация, исключающая необходимость использования буфера. Выходное значение вычисляется на основе нового отсчета и предыдущего выходного значения: $filVal = newVal \cdot k + filVal(1 - k)$, где $k = 0.0 \dots 1.0$.

Коэффициент k определяет степень сглаживания сигнала. Для удобства программной реализации данное выражение было преобразовано путем раскрытия скобок и группирования слагаемых по k : $filVal = newVal \cdot k + filVal - filVal \cdot k$, $filVal = filVal + (newVal - filVal) \cdot k$, $filVal += (newVal - filVal) \cdot k$.

Использование составного оператора сложения позволяет уменьшить количество выполняемых математических операций и, соответственно, повысить быстродействие фильтра экспоненциального среднего.

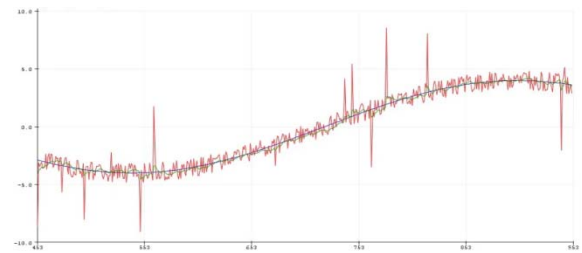


Рисунок 4 – Результат совместного использования фильтра скользящего среднего, экспоненциального и медианного фильтров

Медианный фильтр был реализован как фильтр третьего порядка. Подлежащие фильтрации данные помещались в трехэлементный буфер $float a = buf[0]; float b = buf[1]; float c = buf[2]$. Предложенная программная реализация медианного фильтра не требует вычислений, а только операций сравнения, благодаря чему его наличие не вносит дополнительных задержек при совместном использовании с фильтрами скользящего и экспоненциального среднего.

Пример результата, получаемого при совместном использовании описанных цифровых фильтров для сигнала, подверженного воздей-

ствию шумов и импульсных помех, показан на рисунке 4. Такое использование обеспечивает равно эффективное подавление как выбросов, так и шумовой составляющей сигнала.

Литература

1. Пантелеев, К.В. Цифровой измеритель контактной разности потенциалов / К.В. Пантелеев, А.И. Свистун, А.К. Тявловский, А.Л. Жарин // Приборы и методы измерений. 2016. – Т. 7, № 2. – С. 136–144.
2. Parker, M. Digital Signal Processing. 2nd Edition / M. Parker. – Elsevier Inc., 2017. – 432 p.

УДК 621.317.08

ТЕОРИЯ ДВУМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ФИНИТНЫХ СИГНАЛОВ В ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ В БАЗИСАХ ФУРЬЕ С ВАРЬИРУЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ Пономарев А.В.

*Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашиникова
Ижевск, Российская Федерация*

Теория, методы и алгоритмы компьютерной Фурье-обработки двумерных (2-D) сигналов являются основой решения многих проблем в приборостроении: в области систем управления, обработки информации, разработки новых и совершенствовании существующих методов анализа и обработки информации, управления сложными системами, повышения их эффективности. В цифровой Фурье – обработке двумерное дискретное преобразование Фурье (2-D ДПФ) определяется следующим соотношением:

$$S_{N_1, N_2}(k_1, k_2) = \frac{1}{N_1 \cdot N_2} \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} x(n_1, n_2) W_{N_1}^{k_1 n_1} \cdot W_{N_2}^{k_2 n_2} \quad (1)$$

В теории цифровой Фурье – обработки одномерных (1-D) дискретных сигналов широкое применение находит дискретно-временное преобразование Фурье (ДВПФ). В одномерном случае ДВПФ – это z-преобразование, вычисленное в z-плоскости на единичной окружности.

Двумерное дискретно-пространственное преобразование Фурье (2-D ДППФ) – это двумерное z-преобразование, вычисленное в z-пространстве на единичной сфере:

$$X_{\text{ДППФ}}(f_1, f_2) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(m, n) \cdot z_1^{-m} z_2^{-n} \Big|_{\substack{z_1 = \exp(+j2\pi f_1) \\ z_2 = \exp(+j2\pi f_2)}}; \quad (2)$$

где f_1 и f_2 – непрерывные пространственные частоты.

Отметим, что как в одномерном случае ДВПФ, так и в двумерном случае ДППФ, представляют собой непрерывные преобразования дискретных 1-D и 2-D последовательностей соответственно и являются чисто теоретическими

понятиями 1-D теории и 2-D теории цифровой Фурье – обработки.

ДППФ двумерного сигнала $x(m, n)$ с фундаментальным периодом размерностью $N_1 \times N_2$ может быть аппроксимировано путем вычисления 2-D ДПФ сигнала $x_1(m, n)$ с фундаментальным периодом размерностью $L_1 \times L_2$:

$$x_1(m, n) = \begin{cases} x(m, n); & m = \overline{0, N_1 - 1}; n = \overline{0, N_2 - 1} \\ 0; & m = \overline{L_1 - N_1, L_1 - 1}; n = \overline{L_2 - N_2, L_2 - 1} \end{cases} \quad (3)$$

Сравнивая соотношения (1) и (2) несложно видеть, что 2-D ДПФ двумерного сигнала $x(n_1, n_2)$ равно 2-D ДППФ вычисленному на единичной сфере в точках $\exp(-j2\pi k_1 / N_1)$ и $\exp(-j2\pi k_2 / N_2)$. Анализ теоретических основ дискретной двумерной обработки сигналов на базе преобразований Фурье и соотношений (1 – 3) позволяет сделать следующие важные выводы.

Во-первых, 2-D ДПФ следует понимать как двумерный дискретный ряд Фурье, из свойств которого во многом вытекают свойства двумерного ДПФ.

Во-вторых, свойства 2-D ДПФ (как и свойства одномерного ДПФ (1-D ДПФ)) являются математически точными, и не могут трактоваться как аппроксимация свойств непрерывного преобразования Фурье (НПФ). В то же время одномерное и двумерное ДПФ конечной последовательности могут рассматриваться как аппроксимации соответствующих НПФ.

В-третьих, теория двумерной обработки дискретных сигналов на основе двумерного дискретного преобразования Фурье является теори-

ей двумерной Фурье – обработки финитных двумерных дискретных сигналов.

Проведенный анализ теоретических основ данной теории позволил выявить (сформулировать) следующие взаимосвязанные ее аксиоматические положения (постулаты):

1. Определение двумерных дискретных сигналов на конечной опорной области – фундаментальном периоде, задаваемом вертикальным и горизонтальным периодами.

2. Определение сдвига двумерного дискретного сигнала в виде циклического сдвига путем циклической перестановки его отсчетов на конечной опорной области. Принцип двумерной циклической перестановки отсчетов сигнала на конечной опорной области заключается в следующем: справа или сверху отсчет вышел – соответственно слева или снизу отсчет зашел. Циклическая перестановка может быть также интерпретирована на единичной сфере.

3. Определение полной базисной системы преобразования в виде системы двумерных дискретных экспоненциальных функций.

Отметим, что конечность, периодичность и дискретность последовательностей во временной и частотной областях, а также в пространственной и пространственно-частотной областях приводит к появлению новых свойств 1-D ДПФ и 2-D ДПФ, которые отсутствуют в соответствующих непрерывных преобразованиях Фурье. При этом видоизменяются и некоторые понятия 1-D и 2-D Фурье – обработки непрерывных сигналов (изменяются, например, такие понятия как сдвиг, свертка и корреляция).

В силу того, что каждое целое число k можно представить в виде суммы $k = \text{entire}(k/m) + ((k))_{\text{mod } m}$, где *entire* (англ. *floor*) – символ взятия целой части числа k , m – положительное число, называемое модулем, $((k))_{\text{mod } m}$ – остаток, то циклический сдвиг дискретного сигнала $x(n_1, n_2)$ с прямоугольной опорной областью $SA_{N_1 \times N_2}$ при изменении переменных $n_1 \geq N_1$ и $n_2 \geq N_2$ определяется как:

$$x(n_1, n_2) = x(((n_1))_{\text{mod } N_1}, ((n_2))_{\text{mod } N_2});$$

$$(n_1, n_2) \in SA_{N_1 \times N_2}. \quad (4)$$

Циклическая свертка двух 2-D сигналов $x(n_1, n_2)$ и $y(n_1, n_2)$ в пространственной области, имеющих преобразования Фурье в пространственно-частотной области соответственно $S_{N_1, N_2}(k_1, k_2)$ и $Y_{N_1, N_2}(k_1, k_2)$, определяется следующим выражением

$$x(n_1, n_2) * y(n_1, n_2) \xrightarrow{F}$$

$$\xrightarrow{F} S_{N_1, N_2}(k_1, k_2) \cdot Y_{N_1, N_2}(k_1, k_2). \quad (5)$$

В то же время при Фурье – обработке 2-D сигналов, разработке и моделировании изопланатических систем, нам важна линейная 2-D свертка, при которой одна из двух конечных 2-D последовательностей линейно сдвигается без наложения относительно другой 2-D конечной последовательности.

Метод, позволяющий с помощью 2-D циклической свертки получить линейную 2-D свертку нам известен из одномерной Фурье обработки дискретных сигналов. Этот метод получил название метода дополнения исходного 1-D сигнала нулевыми отсчетами.

Аналогично, в случае 2-D Фурье-анализа наложение 2-D сигналов в пространственной области устраняется путем соответствующего дополнения сворачиваемых дискретных 2-D сигналов соответствующим числом нулевых отсчетов в их опорных областях.

Иллюстрирующий пример.

Пусть задан конечный единичный 2-D сигнал при $N_1 = N_2 = 4$:

$$x(n_1, n_2) = \begin{cases} 1; & \forall n_1 = \overline{0, N_1 - 1}; \forall n_2 = \overline{0, N_2 - 1}; \\ & 1; & \forall n_1 \geq N_1; \forall n_2 \geq N_2 \end{cases}; \quad (6)$$

В графической форме циклическая 2-D корреляционная функция 2-D сигнала (6) приведена на рисунке 1.

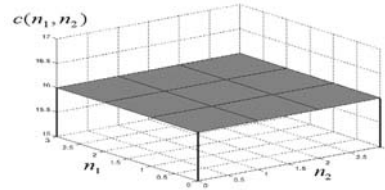


Рисунок 1 – Циклическая 2-D корреляционная функция 2-D сигнала (6)

Дополнив сигнал (6) нулевыми отсчетами:

$$x_0(n_1, n_2) = \begin{cases} 1; & \forall n_1 = \overline{0, N_1 - 1}; \forall n_2 = \overline{0, N_2 - 1} \\ 0; & \forall n_1 = \overline{N_1, 2N_1 - 1}; \forall n_2 = \overline{N_2, 2N_2 - 1} \end{cases} \quad (7)$$

получим в графической форме циклическую 2-D корреляционную функцию 2-D сигнала (7) (рисунок 2).

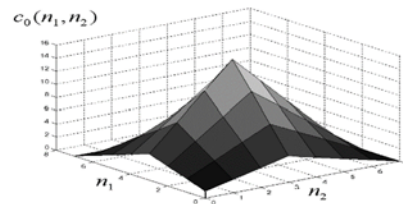


Рисунок 2 – Циклическая 2-D корреляционная функция 2-D сигнала (7)

Сравнение линейной и циклической корреляционных функций, как в матричной, так и в графической форме позволяет оценить необходимость устранения эффекта наложения 2-D корреляционных функций.

Отметим, что дополнение опорной области нулевыми отсчетами более чем в два раза позволяет более детально анализировать 2-D энергетический спектр дискретного сигнала, опираясь на двумерный вариант теоремы Винера-Хинчина. Возможно три варианта дополнения опорной области 2-D сигнала $SA_{N_1 \times N_2}$ нулевыми отсчетами: в горизонтальном, вертикальном и в обоих направлениях.

УДК 621.317.08

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОГИБАЮЩЕЙ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО ФИНИТНОГО ДИСКРЕТНОГО СИГНАЛА

Пономарева О.В.¹, Пономарев А.В.¹, Смирнова Н.В.²

¹Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашиникова

Ижевск, Российская Федерация

²Севастопольский государственный университет

Севастополь, Российская Федерация

Цель работы – исследование теоретических и практических вопросов определения огибающих действительных, дискретных финитных сигналов; анализ их преимуществ и недостатков.

Определение огибающей непрерывного сигнала методом преобразования Гильберта на бесконечном интервале. Действительный сигнал $x(t)$, $-\infty < t < +\infty$, может быть представлен равноправными моделями во временной области:

$$x(t) = A(t) \cdot \cos[\phi(t)], \quad (1)$$

и в частотной области:

$$x(t) = \sum_k A_k \cos(2\pi f_k t + \varphi_k) \quad (2)$$

где $A(t)$ – мгновенная амплитуда (огибающая) сигнала; $\phi(t)$ – мгновенная фаза сигнала $x(t)$; A_k – амплитуда k гармонической компоненты; f_k – частота k гармонической компоненты; φ_k – начальная фаза k гармонической компоненты.

Если поставить в соответствие сигналу $x(t)$ (1) некоторый комплексный сигнал $y(t)$:

$$y(t) = x(t) + j \cdot v(t), \quad (3)$$

и представить сигнал $y(t)$ в виде:

$$y(t) = \left(\sqrt{x^2(t) + v^2(t)} \right) \cdot \exp \left\{ j \cdot \arctg \frac{v(t)}{x(t)} \right\} =$$

При этом каждый из трех вариантов порождает множество базисов, названных автором базисами Фурье с варьируемыми параметрами первого, второго и третьего рода.

В докладе подробно исследуются свойства этих новых базисов Фурье.

Литература

1. Alexey V. Ponomarev. Systems Analysis of Discrete Two-Dimensional Signal Processing in Fourier Basis // Advances in Signal Processing. Theories, Algorithms, and System Control. Editor: Margarita Favorskaya, Lakmi C. Jain. // Springer. – 2020. – P. 87–97.

$$= A(t) \cdot \exp\{j \cdot \phi(t)\}, \quad (4)$$

то мгновенные параметры (мгновенная фаза, огибающая и мгновенная частота) сигнала будут определены однозначно. Существующие различия в определениях мгновенных параметров сигнала $x(t)$, объясняется выбором оператора \mathfrak{R} . Отметим, что выбор оператора \mathfrak{R} должен обеспечивать «хорошие» (удобные и понятные с физической точки зрения) свойства мгновенных параметров сигнала $x(t)$. Кратко перечислим эти условия. Огибающая гармонического сигнала должна совпадать с привычным понятием его амплитуды, а мгновенная частота с обычным понятием его частоты. Малые среднеквадратичные отклонения исходного сигнала $x(t)$ должны приводить к малым среднеквадратичным отклонениям огибающей и мгновенной частоты. Мгновенная фаза и частота не должны зависеть от мощности сигнала.

Известно, что если выбирать оператор \mathfrak{R} с учетом выполнения этих вполне понятных требований, то единственным линейным (аддитивным) оператором, удовлетворяющим указанным выше условиям, является оператор Гильберта \mathfrak{I} :

$$v(t) = \mathfrak{I}[x(t)] = \text{VP} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau, \quad (5)$$

где VP – символ главного значения по Коши.

В том случае, когда сигнал $x(t)$ интегрируется в квадрате, то:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega; \quad (6)$$

где $S(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt$ – спектральная плотность сигнала $x(t)$.

Поставив в соответствие эрмитовой функции $S(j\omega)$ эрмитову функцию $V(j\omega)$ вида:

$$V(j\omega) = \begin{cases} -jS(j\omega), & \omega > 0 \\ 0, & \omega = 0 \\ jS(j\omega), & \omega < 0 \end{cases}, \quad (7)$$

Нетрудно видеть, что обратное преобразование Фурье $V(j\omega)$ определяет преобразование Гильберта (ПГ) сигнала $x(t)$:

$$v(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} V(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega. \quad (8)$$

Формулами (5) и (8) определены соответственно два равноправных метода получения ПГ действительного сигнала $x(t)$: во временной и частотной областях. Соотношение (7) иллюстрирует физический смысл ПГ: фазовый поворот $V(j\omega)$ относительно $S(j\omega)$ на положительных частотах на $-\pi/2$, на отрицательных частотах на $+\pi/2$.

Сигнал (3), мнимая часть которого формируется с помощью оператора Гильберта \mathfrak{H} , называют гильбертовым сигналом $y_{\mathfrak{H}}(t)$, мнимую часть которого называют сопряженным сигналом $v_{\mathfrak{H}}(t)$ по отношению к сигналу $x(t)$:

$$y_{\mathfrak{H}}(t) = x(t) + j \cdot v_{\mathfrak{H}}(t). \quad (9)$$

ПГ не локальное преобразование, поскольку согласно соотношению (6) для нахождения сопряженного сигнала $v_{\mathfrak{H}}(t)$ требуется знать сигнал $x(t)$ при изменении t от $-\infty$ до $+\infty$. В то же время ПГ асимптотически локальное преобразование, поскольку ядро этого преобразования есть функция вида $\sin(x)/x$. В связи с тем, что ПГ не обладает свойством локальности, гильбертова огибающая нефинитна.

Определение огибающей непрерывного финитного сигнала методом преобразования Гильберта-Коржика. На практике часто необходимо иметь преобразование, которое для финитных сигналов давало бы финитный сопряженный сигнал и финитную огибающую. Возникает проблема, для решения которой

предложена модификация ПГ – преобразование Гильберта-Коржика (ПГ-К). Суть данной модификации ПГ заключается в периодическом продолжении финитного сигнала $x(t)$ длительностью T на всю временную ось: $-\infty < t < +\infty$. Такая операция приводит к получению нового периодического сигнала $x_p(t)$ с периодом T , получению нового периодического сопряженного сигнала $v_{\mathfrak{H},p}(t)$ с периодом T , путем наложения сопряженного сигнала $v_{\mathfrak{H}}(t)$ во временной области и к финитности гильбертовой огибающей периодически продолженного сигнала $x_p(t)$. Таким образом, ПГ-К, во-первых, только частично решает проблему финитности гильбертовой огибающей, во-вторых, приводит к дополнительным погрешностям определения «истинной» гильбертовой огибающей методического характера.

Определение огибающей дискретного финитного сигнала методом дискретного преобразования Гильберта на основе дискретного преобразования Фурье. Рассмотрим эффективный способ получения гильбертова дискретного финитного сигнала – реализацию дискретного ПГ (ДПГ) на основе дискретного преобразования Фурье. Прямое дискретное преобразование Фурье (ДПФ), получившее в настоящее время широчайшее распространение благодаря алгоритмам быстрого преобразования Фурье, в алгебраической форме задается следующим выражением:

$$S_N(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn};$$

$$W_N = \exp(-j \frac{2\pi}{N}), \quad k = \overline{0, (N-1)}, \quad (10)$$

где $x(n)$ – дискретный сигнал, заданный на N – интервале, т. е. $n = \overline{0, N-1}$, $S_N(k)$ – коэффициенты ДПФ (бины);

ДПГ сигнала $x(n)$; $n = \overline{0, N-1}$ в частотной области на основе ДПФ определим в следующем виде:

$$x_{\mathfrak{H}\tilde{O},\mathfrak{H}}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} V_N(k) W_N^{-kn};$$

$$V_N(k) = \begin{cases} -j \cdot S_N(k) & \text{и} \text{д} \text{е} \quad k = \overline{1, (N/2-1)}; \\ S_N(k) = 0 & \text{и} \text{д} \text{е} \quad k = 0; k = N/2; \\ +j \cdot S_N(k) & \text{и} \text{д} \text{е} \quad k = \overline{(N/2+1), (N-1)}; \end{cases} \quad (11)$$

где $x_{\mathfrak{H}\tilde{O},\mathfrak{H}}(n)$ – сопряженный сигнал, полученный методом ДПФ.

Гильбертов сигнал:

$$y_{\text{АГО}}(n) = x(n) + j \cdot x_{\text{АГО}}(n), \quad (12)$$

позволяет однозначно определить огибающую действительного дискретного сигнала $x(n)$ методом ДПФ:

$$A_{\text{АГО}}(n) = \sqrt{x^2(n) + x_{\text{АГО}}^2(n)}. \quad (13)$$

Отметим, что ДПГ в частотной области на основе ДПФ, по сути дела, является дискретным вариантом преобразования ПГ-К. ДПГ на базе ДПФ лишь асимптотически локальное преобразование и не дает решения главной проблемы определения огибающей – ее нефинитности. Происходит по сути дела «маскирование» этого недостатка ДПГ путем наложения сопряженного сигнала.

УДК 535.37

ГРАДУИРОВОЧНЫЕ ШКАЛЫ ДЛЯ ДЕТЕКТОРОВ ЖЕСТКИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ОСНОВЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РАСТВОРОВ, СОДЕРЖАЩИХ ПОЛИМЕТИНОВЫЕ КРАСИТЕЛИ

Попечин В.И.

*Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Растворы органических красителей в органических и неорганических растворителях имеют интенсивные полосы поглощения в оптической области спектра электромагнитных волн (обладают цветом). При облучении раствора красителя ультрафиолетовым, рентгеновским или гамма-излучением происходит обесцвечивание (уменьшение оптической плотности) раствора, вызванное деструкцией красителя, которая, как показали исследования, обусловлена химическим взаимодействием молекул красителя с продуктами радиолиза растворителя (химически активные радикалы и ион-радикалы) [1].

В многокомпонентных растворах, содержащих несколько красителей и растворитель, наряду с обесцвечиванием происходит изменение цвета раствора, так как разные красители характеризуются, как правило, различной скоростью радиационной деструкции. Простейшим многокомпонентным раствором красителей является трехкомпонентный раствор, содержащий два красителя, поглощающие свет в разных спектральных областях оптического излучения, и растворитель. По изменению цвета и насыщенности цвета (спектральных характеристик) облучаемого жестким излучением многокомпонентного раствора можно визуально определить величину воздействующей на раствор радиационной дозы. Для этого необходимо построить соответствующую данному раствору градуировочную цветовую шкалу [2].

Проведенные авторами исследования [1, 2] позволили сделать вывод о том, что основным источником относительной погрешности в измерении огибающей, является отсутствие у нее свойства финитности.

Литература

1. Olga V. Ponomareva, Alexey V. Ponomarev. Sliding Spatial Frequency Processing of Discrete Signals // Advances in Signal Processing. Theories, Algorithms, and System Control. Editor: Margarita Favorskaya, Lakmi C. Jain. // Springer. – 2020. – P. 97–111.
2. Alexey V. Ponomarev. Systems Analysis of Discrete Two-Dimensional Signal Processing in Fourier Basis // Advances in Signal Processing. Theories, Algorithms, and System Control. Editor: Margarita Favorskaya, Lakmi C. Jain. // Springer. – 2020. – P. 87–97.

Для построения градуировочной цветовой шкалы необходимо сначала провести измерение зависимости интенсивности поглощения (оптической плотности раствора) в максимумах длинноволновых полос поглощения красителей от времени облучения раствора ионизирующим излучением известной мощности дозы. Проведенные измерения показали, что такая зависимость является экспоненциальной.

Оптическая плотность раствора в максимуме длинноволновой полосы поглощения пропорциональна концентрации не разрушенных молекул красителя. Для характеристики скорости радиационного разрушения молекул красителя в растворе обычно используются времена «полуразрушения» (уменьшения вдвое исходной концентрации красителя) в секундах в расчете на мощность дозы 1 Гр/с ($t_{1/2}$).

Важную роль играет выбор первоначальных концентраций красителей трехкомпонентного раствора. Если оптическая плотность трехкомпонентного раствора больше примерно 2,5, то цветовые различия между несколькими первыми полосками будут небольшими, что уменьшает точность визуального определения поглощенной дозы. Высокая первоначальная концентрация раствора позволяет увеличить диапазон регистрируемых визуально радиационных доз (от первоначальной концентрации до практически полного обесцвечивания раствора), но уменьшает точность определения дозы, а

уменьшая первоначальную концентрацию можно увеличить точность, но при этом уменьшается регистрируемый диапазон доз. Поэтому, первоначальные концентрации красителей в трехкомпонентном растворе следует подбирать, исходя из конкретных требований, предъявляемым к радиационным дозиметрам данного типа.

В данной работе проведены исследования спектрально-оптических характеристик детекторов жестких излучений на основе трехкомпонентных растворов органических красителей, в которых в качестве красителя, поглощающего свет в длинноволновой области видимого диапазона спектра, был выбран полиметиновый краситель из серии полиметиновых (трикарбоданиновых) красителей, синтезированных в последние годы в НИИПФП имени А.Н. Севченко БГУ.

Для приготовления трехкомпонентного раствора (два красителя и растворитель) вначале приготавливались водно-спиртовые растворы (70 % дистиллированной воды по объему + 30 % этилового спирта) красителя, который поглощал свет в коротковолновом диапазоне видимого света, и полиметинового красителя, который поглощал свет в длинноволновом диапазоне. Затем эти растворы сливались в равных объемах (для упрощения расчетов концентраций облученных трехкомпонентных растворов). Цвет первоначально приготовленного (необлученного) раствора соответствует цвету полоски под № 0 на приведенных ниже рисунках.

На рисунке 1 приведена градуировочная цветовая шкала для водно-этанольного раствора родамина С + полиметиновый краситель ПК 7031. Измерения времен «полуразрушения» данных красителей в указанном растворе при облучении раствора гамма квантами Co^{60} в расчете на мощность дозы 1 Гр/с дали значения $t_{1/2} = 260$ с для родамина С и $t_{1/2} = 54$ с для полиметинового красителя ПК 7031.

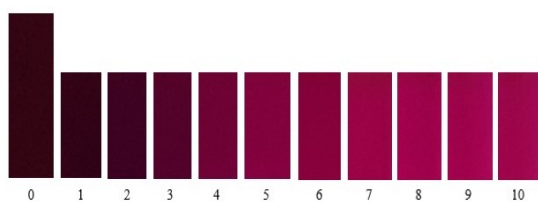


Рисунок 1 – Градуировочная цветовая шкала для водно-этанольного раствора (по объему 70 % вода + 30 % этанол) красителей: родамин С (первоначальная концентрация 10^{-4} моль/л) + полиметиновый краситель ПК 7031 (первоначальная концентрация – $1,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л): 0 – необлученный раствор; 1 – доза облучения 50 Гр; 2 – 100 Гр; 3 – 150 Гр; 4 – 200 Гр; 5 – 250 Гр; 6 – 300 Гр; 7 – 350 Гр; 8 – 400 Гр; 9 – 450 Гр; 10 – 500 Гр

На рисунке 2 приведена градуировочная цветовая шкала для водно-этанольного раствора

урапин + полиметиновый краситель ПК 7006. Измерения времен «полуразрушения» данных красителей в указанном растворе при облучении раствора гамма квантами Co^{60} в расчете на мощность дозы 1 Гр/с дали значения $t_{1/2} = 320$ с для урапина и $t_{1/2} = 110$ с для полиметинового красителя ПК 7006.

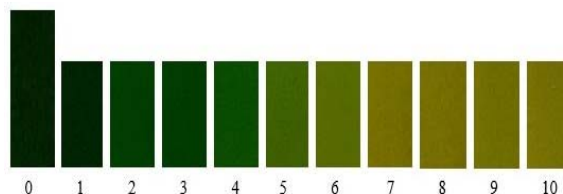


Рисунок 2 – Градуировочная цветовая шкала для водно-этанольного раствора (по объему 70 % вода + 30 % этанол) красителей: урапин (первоначальная концентрация 10^{-4} моль/л) + полиметиновый краситель ПК 7006 (первоначальная концентрация – $3 \cdot 10^{-4}$ моль/л): 0 – необлученный раствор; 1 – доза облучения 50 Гр; 2 – 100 Гр; 3 – 150 Гр; 4 – 200 Гр; 5 – 250 Гр; 6 – 300 Гр; 7 – 350 Гр; 8 – 400 Гр; 9 – 450 Гр; 10 – 500 Гр

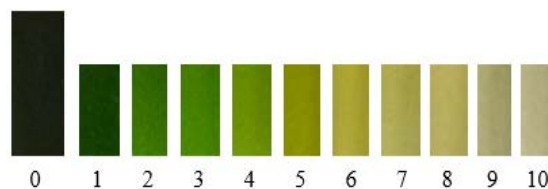


Рисунок 3 – Градуировочная цветовая шкала для водно-этанольного раствора (по объему 70 % вода + 30 % этанол) красителей: метиловый оранжевый (первоначальная концентрация $5 \cdot 10^{-5}$ моль/л) + полиметиновый краситель ПК 7148 (первоначальная концентрация – 10^{-4} моль/л): 0 – необлученный раствор; 1 – доза облучения 100 Гр; 2 – 200 Гр; 3 – 300 Гр; 4 – 400 Гр; 5 – 500 Гр; 6 – 600 Гр; 7 – 700 Гр; 8 – 800 Гр; 9 – 900 Гр; 10 – 1000 Гр

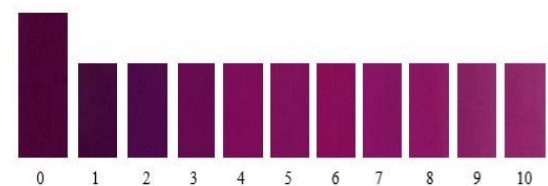


Рисунок 4 – Градуировочная цветовая шкала для водно-этанольного раствора (по объему 70 % вода + 30 % этанол) красителей: родамин С (первоначальная концентрация $5 \cdot 10^{-5}$ моль/л) + кислотный зеленый антрахиноновый Н2С (первоначальная концентрация $3 \cdot 10^{-5}$ моль/л) + полиметиновый краситель ПК 7031 (первоначальная концентрация – $7,5 \cdot 10^{-5}$ моль/л): 0 – необлученный раствор; 1 – доза облучения 50 Гр; 2 – 100 Гр; 3 – 150 Гр; 4 – 200 Гр; 5 – 250 Гр; 6 – 300 Гр; 7 – 350 Гр; 8 – 400 Гр; 9 – 450 Гр; 10 – 500 Гр

На рисунке 3 приведена градуировочная цветовая шкала для водно-этанольного раствора метилового оранжевого + полиметиновый краситель ПК 7148. Измерения времен «полуразрушения»

данных красителей в указанном растворе при облучении раствора гамма квантами Co^{60} в расчете на мощность дозы 1 Гр/с дали значения $t_{1/2} = 290$ с для метилового оранжевого и $t_{1/2} = 120$ с для полиметинового красителя ПК 7148.

На рисунке 4 приведена градуировочная цветовая шкала для многокомпонентного водно-этанольного раствора родамина С + кислотный зеленый антрахиноновый Н2С + полиметиновый краситель ПК 7031. Измерения времени «полуразрушения» в указанном растворе при облучении раствора гамма квантами Co^{60} в расчете на

мощность дозы 1 Гр/с дали значение $t_{1/2} = 280$ с для кислотного зеленого антрахинонового.

Литература

1. Попечиц В.И. Влияние гамма-облучения на спектры поглощения растворов кислотных красителей / В.И. Попечиц // Журнал прикладной спектроскопии. – 2003. – Т. 70, № 1. – С. 34–37.
2. Попечиц В.И. Регистрирующие системы для радиационного неразрушающего контроля на основе трехкомпонентных растворов органических красителей / В.И. Попечиц // Приборы и методы измерений – 2015. – Т. 6, № 2. – С. 173–180.

УДК 531.383

ВОЛНОВОЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ГИРОСКОП ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Распопов В.Я.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация

Волновой твердотельный гироскоп (ВТГ) с металлическим резонатором в значительной степени удовлетворяет требованиям на данном этапе развития гироскопической техники для применения в системах навигации, автоматического управления подвижными объектами и целеуказания, открывает новые перспективы для дальнейшего совершенствования гироскопических систем.

По сравнению с другими видами гироскопов, ВТГ с металлическим резонатором, имеет ряд преимуществ: полностью отсутствуют подвижные части, поэтому рабочий ресурс прибора достигает 15000 час и более; небольшие вес и габариты (20–80 г. при \varnothing 10–40 мм); малая энергоёмкость (несколько Вт); малое время готовности (1–5 с); сохранение работоспособности при кратковременном отключении электропитания (2–5 с); способность работать в двух режимах – свободной волны и силовой компенсации; слабая температурная зависимость выходного сигнала; способность выдерживать большие перегрузки; высокое отношение точность/цена; стойкость к ионизирующему излучению высокой энергии.

К ВТГ-ДУС с металлическим резонатором предъявляются следующие, примерные требования, обеспечение которых делает его конкурентноспособным для тактических применений (таблица 1).

Разработка конструкции, технологии и производственное освоение ВТГ с металлическим резонатором потребовало решения ряда новых научных, технических и технологических задач.

На кафедре «Приборы управления» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по схеме рисунок 1 разработан ВТГ-ДУС, опыт-

ное производство которого освоено в АО «Ми-чуринский завод «Прогресс».

Таблица 1 – Требования к ВТГ-ДУС с металлическим резонатором

По условиям применения:	
диапазон измеряемых угловых скоростей	(0,01–9000) град/сек
потребляемая мощность одноосного ВТГ при напряжении питания 15 В не более	(1,5–2) Вт
температурный рабочий диапазон	(–50+60) °С
относительная влажность	98 % при $t = +35$ °С
диапазон давлений	от атмосферного до соответствующего высоте 3000 м над уровнем моря
многократные механические удары	(200–400) м/с ² длительностью 6 мс
случайная вибрация	(5–2000) Гц со спектральной плотностью 4,8 м/с ² /Гц и среднеквадратичным суммарным ускорением 31 м/с ²
синусоидальная вибрация	50 м/с ² , (5–500) Гц
По точности:	
уход	(1–30) °/час
порог чувствительности	0,005 °/сек (не более)
смещение нуля	(1–10) °/ч (не более)
отклонение масштабного коэффициента от линейности в рабочем диапазоне температур	3,5 · 10 ⁻³ % (не более)

Таблица 2 – Сравнение технических характеристик ВТГ INL-CVG-G200 фирмы INNALABS и ВТГ, разработанным ФГБОУ ВО ТулГУ

Параметр	INNALABS	ФГБОУ ВО ТулГУ
Количество осей	2	до 3 включительно
Формат выходных данных	цифровой	Цифровой, аналоговый
Интерфейс	RS-232/422/485	CAN, RS-232/422/485, SPI
Частота передачи выходных данных	2000–9000 Гц	500–10000 Гц
Температурная компенсация	есть	есть
Диапазон измерения	до ± 250 °/с*	до ± 2000 °/с*
Полоса пропускания	до 150 Гц*	до 50 Гц*
Нестабильность нулевого сигнала	не более 0,1 °/ч	не более 0,6 °/ч
Случайное блуждание	0,01 °/√час	0,06 °/√час
Шум покоя, RMS	не более 0,01 °/с	не более 0,025 °/с
Ошибка масштабного коэффициента во всем диапазоне температур	не более 0,35%	не более 0,05 %** не более 0,005 %***
Время запуска	не более 1 с	не более 3 с
Время выхода на режим	не более 50 с	не более 6 с
Потребляемая мощность	не более 3,3 Вт	не более 4 Вт
Диапазон рабочих температур	от –40 °С до +85 °С	от –40 °С до +85 °С
Диапазон температур хранения	от –55 °С до +90 °С	от –55 °С до +90 °С
Электромагнитные влияния	не защищено	не защищено

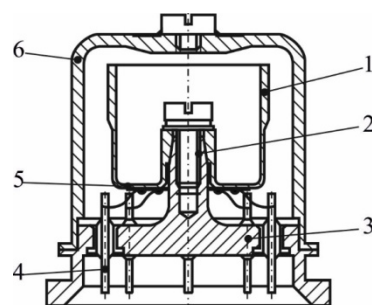


Рисунок 1 – Основные узлы ВТГ:
1 – резонатор; 2 – узел крепления; 3 – основание (корпус); 4 – гермовывод; 5 – пьезоэлемент; 6 – крышка (кожух)

В таблице 2 приведены сравнительные характеристики ВТГ INL-CVG-G200 фирмы INNALABS и ВТГ ФГБОУ ВО ТулГУ.

Литература

1. Журавлев В.Ф., Климов Д.М. Волновой твердотельный гироскоп. – М.: Наука, 1985. – 125 с.
2. Матвеев В.А., Липатников В.И., Алехин А.В. «Проектирование волнового твердотельного гироскопа». – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997. – 165 с.
3. Развитие теории создания волновых твердотельных гироскопов с металлическим резонатором / В.А. Матвеев, М.А. Басараб, Б.С. Лунин, Е.А. Чуманкин, А.В. Юрин // Вестник РФФИ. Фундаментальная инженерия. – 2015. – № 3 (87). – С. 84–96.
4. Распопов В.Я., Волчихин И.А., Волчихин А.И., Ладонкин А.В., Лихошерст В.В., Матвеев В.В. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором / Под ред. В.Я.Распопова. – Тула: Издательство ТулГУ, 2018. – 189 с.
5. Chikovani V.V., Yatsenko Yu. A., Kovalenko V.A., Scherban V.I. Digitally controlled High Accuracy Metallic Resonator CVG//Proc/ Symposium Gyro Technology, 2006, Stuttgart. – P. 40–47.

УДК 539.2

ГАЗОРАЗРЯДНАЯ ЭПИТАКСИЯ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР Воробей Р.И., Гусев О.К., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И., Свистун А.И.

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Выращивание эпитаксиальных слоев является одним из важнейших этапов формирования полупроводниковых приборных структур. Увеличение разнообразия применяемых материалов, типов приборных структур и готовых приборов требует применения либо принципиально новых технологических приемов, либо пересмотра известных методов. Как правило, эпитаксиальные структуры содержат множество слоев, включая переходные и компенсирующие, с существенно отличающимися концентрацией различного типа проводимости.

Одним из технологических приемов формирования эпитаксиальных слоев является метод газоразрядного легирования в режиме тлеющего разряда. При этом легирование слоев осуществляется формированием примесных соединений в лазерной плазме. В методе эпитаксиального выращивания в режиме тлеющего разряда в газоразрядную камеру помещаются электроды, содержащие основную легирующую примесь и редкоземельную геттерирующую примесь [1]. При подаче напряжения на электроды (несколько кВ) в межэлектродном пространстве форми-

руется газоразрядная плазма, содержащая и легирующую, и геттерирующую примеси. В процессе выращивания редкоземельные элементы активно взаимодействуют с кислородом в кремнии, осуществляя при этом своеобразную очистку кремния. Атомы редкоземельных элементов влияют на накопление термодфектов, возникающих при термообработке в процессе изготовления кремниевых полупроводниковых приборов. Геттерирование кремния редкоземельными элементами приводит к увеличению времени жизни неравновесных носителей заряда в 4–6 раз, в зависимости от вида редкоземельного элемента. Для легирования эпитаксиальных слоев основной примесью одновременно с геттерированием используются методы твердофазного легирования, например, газоразрядный в режиме тлеющего разряда или лазерный метод, при котором материал мишени испаряется при воздействии лазерного излучения.

Для оценки качества таких эпитаксиальных слоев использовались различные методы. Так, например, анализ спектров низкотемпературной люминесценции показал, что отличительная особенность спектров эпитаксиальных структур по отношению к спектрам монокристаллического кремния состоит в наличии дополнительной полосы с энергией 1,042 эВ и полушириной 0,012 эВ. Наиболее вероятно, что эта полоса связана с рекомбинацией носителей заряда на центрах, включающих атомы лантана, как материала электродов, используемых при получении газового разряда. Интенсивная полоса с энергией 1,093 эВ обусловлена излучательной рекомбинацией экситонов, локализованных на атомах бора. Изменение режима выращивания эпитаксиальных пленок приводит и к изменению интенсивности полос люминесценции, структура и интенсивность которых отражает уровень легирования. Большая ширина полос экситонного поглощения в эпитаксиальных пленках по сравнению с монокристаллической подложкой очевидно связана с наличием внутренних напряжений в эпитаксиальной пленке, особенно на границе раздела.

В процессе газоразрядного выращивания формировались эпитаксиальные слои с удельным электрическим сопротивлением от 1 до 10 Ом/кв с разбросом значений не хуже 10 % [2]. Плотность дефектов упаковки для 80 % просмотренных полей составляет не более $0,4 \times 10^2 / \text{см}^2$, а плотность дислокаций – не более $10 / \text{см}^2$.

Как подложка, так и эпитаксиальный слой после выращивания контролировались методом сильносигнальной поверхностной фото-ЭДС (SPV) [3]. Благодаря выбору неразрушающего метода контроля стало возможным сопоставление пространственных распределений поверх-

ностного потенциала на разных стадиях изготовления эпитаксиальных структур. При этом обнаружено совпадение пространственных распределений поверхностной фото-ЭДС подложки и эпитаксиального слоя, что свидетельствует о том, что дефекты эпитаксиального слоя обуславливаются в основном дефектами подложки, прорастающими при эпитаксии. После измерений SPV поверхность эпитаксиальной пленки протравливалась в травителе Сиртла для выявления дефектов. Следует отметить, что участкам с повышенной плотностью дефектов соответствуют участки с отклонениями значений SPV от среднего значения, как в сторону уменьшения, так и увеличения электрического потенциала, причем величина отклонения также не пропорциональна плотности дефектов (рисунок 1). Иными словами, по картине пространственного распределения SPV можно судить о местоположении скоплений дефектов, но не об их плотности. На рисунке 2 представлены типичные картины морфологии, полученных методом электронной микроскопии, участков поверхности эпитаксиальных слоев и соответствующие им распределения поверхностной фото-ЭДС – слева для низкодефектных участков поверхности (размер дефектов около 250 нм), справа для участков с повышенной плотностью дефектов (размер дефектов от 150 до 1500 нм).

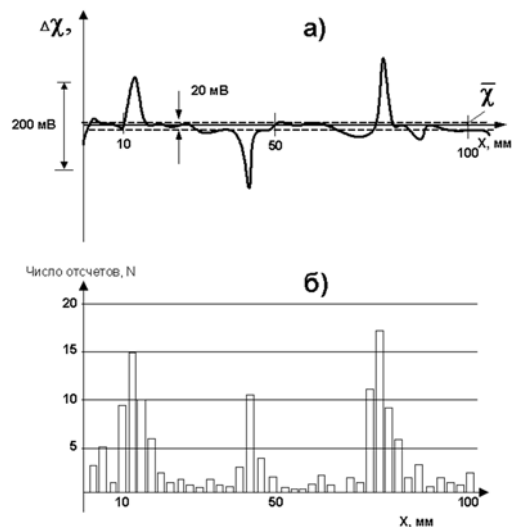


Рисунок 1 – Пространственное распределение поверхностной фото-ЭДС на Si подложке (а) и соответствующее ему распределение плотности дефектов N в эпитаксиальном слое (б)

Прослеживается четкая взаимосвязь резких изменений SPV с микроморфологией поверхности монокристаллической подложки и структурным совершенством эпитаксиальных слоев, выращенных на этих поверхностях. Пространственные координаты резких отклонений поверхностного потенциала соответствуют лока-

лизации макроскопических дефектов, выходящих на поверхность. Обнаружено, что локальным отклонениям потенциала поверхности SPV более 25 мВ соответствует локализация повышенной плотности дефектов (дислокации, микроскопления примеси).

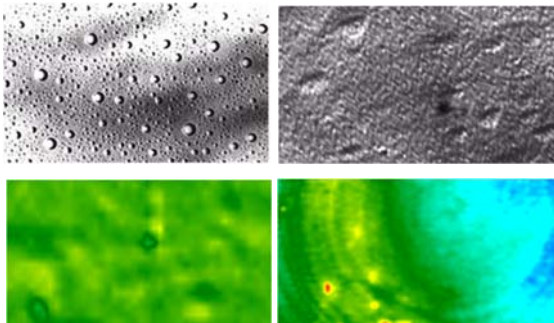


Рисунок 2 – Микроморфологии участков поверхности эпитаксиальных слоев и соответствующие им распределения поверхностной фото-ЭДС

Пространственное распределение сильно-сигнальной поверхностной фото-ЭДС, соответствующей приповерхностному изгибу энергетических зон, и распределение дефектов эпитаксиального слоя совпадают не для всех участков полупроводниковых пластин. Очевидно, это связано с тем, что локальные отклонения в распределении поверхностной фото-ЭДС от среднего обусловлены неоднородным распределением остаточных примесей из обрабатывающих растворов при подготовке пластин к эпитаксии, адсорбцией отдельных загрязняющих частиц. Эти неоднородности в распределении SPV и адсорбированных частиц не всегда связаны со структурными дефектами и не во всех случаях

приводят к генерации дефектов в эпитаксиальной пленке.

Таким образом, изменения распределения поверхностного потенциала связаны с изменениями распределения остаточных загрязнений на поверхности подложки и дефектов в подложках, наследуемых эпитаксиальными слоями.

Локальные изменения сильно-сигнальной поверхностной фото-ЭДС соответствуют локализации структурных неоднородностей с характерными размерами более 500 нм/

Интенсивность полос низкотемпературной люминесценции пропорциональна концентрации гетеризирующей примеси, а смещение узких полос люминесценции и их уширение соответствует величине внутренних напряжений в эпитаксиальных структурах.

Литература

1. Пилипенко В.А., Горушко В.В., Петлицкий А.Н., Турцевич А.С., Шведов С.В. Методы и механизмы геттерирования кремниевых структур в производстве интегральных микросхем. // Технология и конструирование в производстве интегральных схем, – 2013, № 2–3. – С. 43–57.
2. Зондовые электрометрические методы для измерения удельного электрического сопротивления ионно-легированных и диффузионных слоев / А.К. Тявловский [и др.] // Приборостроение: материалы 12 между-нар. науч.-техн. конф., Минск, 13–15 ноября 2019 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 36–38.
3. Характеризация электрофизических свойств границы раздела кремний-двуокись кремния с использованием методов зондовой электрометрии / В.А. Пилипенко [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2017, Т. 8, № 4. – С. 344–356.

УДК 629.7.054

ИНЕРЦИОННЫЕ МОМЕНТЫ СИСТЕМ НАВЕДЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Лихошерст В.В., Родионов В.И.

ТулГУ «Тулский государственный университет»
Тула, Российская Федерация

Современная система бортового электрооборудования летательного аппарата (ЭЛА) имеет в своем составе приборы наблюдения, которые устанавливаются на корпусе летательного аппарата (ЛА) в кардановых подвесах, позволяющих им совершать сложное угловое движение относительно корпуса ЛА. Электродвигатели (ЭД), обеспечивающие такое движение по осям карданова подвеса работают в условиях постоянно изменяющихся управляющих и возмущающих воздействий. При этом они должны преодолевать инерционные моменты, создаваемые угловыми ускорениями и скоростями наведения оси визирования (ОВ) прибора и качки ЛА.

В докладе рассматривается двухосная система слежения оптико-электронного прибора, работающая в режиме стабилизированного наведения. Такая следящая система (СС) имеет платформу, наружную рамку и ЭД карданова подвеса (рисунок 1).

На рисунке 1 приведены следующие обозначения: НП – направление полета ЛА; ЗЛВ – заданная линия визирования, связанная с объектом наблюдения; $X_0Y_0Z_0$, $X_1Y_1Z_1$, $X_2Y_2Z_2$ – системы координат, связанные с ЛА, наружной рамкой и ОВ соответственно; $\omega_{y2}, \omega_{z2}, \omega_{ly}, \omega_{lz}, \omega_{ox}, \omega_{oy}, \omega_{oz}$ – проекции абсолютных угловых скоростей

ОВ, ЗЛВ и ЛА; $\varphi_Y, \varphi_Z, \varphi_A, \varphi_B$ – проекции пеленга ОВ и ЗЛВ; α, β – проекции углового отклонения ОВ относительно ЗЛВ.

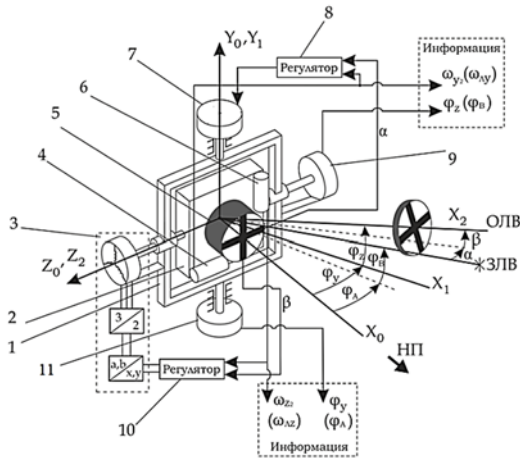


Рисунок 1 – Схема двухосной следящей системы:
1 – наружная рамка; 2 – платформа; 3 – ЭП;
4 – гироскоп; 5 – ОЭД; 6 – датчик угла

В настоящее время существенно повышаются требования к скоростям и точности наведения ОВ. Это приводит к усложнению методов управления и требует повышения достоверности исследования происходящих в них процессов, в частности, становится необходимым учитывать влияние переменных углов пеленга на динамические погрешности стабилизации и наведения ОВ [2]. С целью повышения точности исследования в докладе применяется метод декомпозиции, основанный на принципе «наведение-стабилизация», в котором в качестве первого приближения при оценке динамической погрешности многоосной следящей системы используются ее кинематические уравнения [3]. Для двухосной СС, приведенной на рисунке 1, кинематические уравнения имеют следующий вид:

$$\varphi_Y = \varphi_A + \frac{\alpha}{\cos \varphi_B}; \quad \varphi_Z = \varphi_B + \beta. \quad (1)$$

При такой декомпозиции динамическая модель проекций α, β погрешности двухосной СС в первом приближении распадается на две независимые системы линейных дифференциальных уравнений по каждому каналу движения ОВ [3].

Известно, что инерционный момент, действующий вокруг оси наружной рамки имеет следующий вид [4]:

$$M_Y^{ин} = -(J_{Y1} + J_{Y2} \cos^2 \varphi_Z + J_{X2} \sin^2 \varphi_Z) \dot{\omega}_{Y2} / \cos \varphi_Z - (J_{Y1} + J_{X2}) \dot{\omega}_{X1} \operatorname{tg} \varphi_Z - (J_{X2} - J_{Z2}) \omega_{X2} \omega_{Z2} \cos \varphi_Z + (J_{Y2} - J_{Z2}) \omega_{Y2} \omega_{Z2} \sin \varphi_Z + (J_{Z1} - J_{X1}) \omega_{X1} \omega_{Z1}, \quad (2)$$

$J_{X1}, J_{Y1}, J_{X2}, J_{Y2}, \omega_{X1}, \omega_{Z1}, \omega_{X2}, \omega_{Y2}, \omega_{Z2}$ – моменты инерции и угловые скорости наружной

рамки и платформы по осям X и Y соответственно.

С учетом формул (1) выражение (2) принимает следующий вид:

$$M_Y^{ин} = -J_Y \dot{\omega}_{Y2} / \cos \varphi_B - (J_{Y1} + J_{X2}) [\dot{\omega}_\xi \sin \varphi_B + (\omega_{ЛЗ} - \omega_{ОХ} \sin \varphi_A - \omega_{ОZ} \cos \varphi_A) \omega_{ЛП} \operatorname{tg} \varphi_B / \cos \varphi_B] - (J_{Y1} + J_{X2} - J_{Z2}) \omega_\xi \omega_{ЛЗ} \cos \varphi_B + (J_{Y2} - J_{X2}) \times \omega_{ЛП} \omega_{ЛЗ} \sin \varphi_B - (J_{X1} - J_{Y1} - J_{Z1}) [\omega_{ОZ} \omega_{ОХ} \cos 2\varphi_A + 0.5(\omega_{ОZ}^2 - \omega_{ОХ}^2) \sin 2\varphi_A]. \quad (3)$$

где

$$J_Y = J_{Y1} + J_{Y2} \cos^2 \varphi_Z + J_{X2} \sin^2 \varphi_Z.$$

Здесь проекции пеленга ЗЛВ φ_A, φ_B и ω_ξ определяются из уравнений кинематики ЗЛВ по формулам [2]:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_A &= \frac{\omega_{ЛП}}{\cos \varphi_B} - \omega_{ОY} + \omega_\xi \sin \varphi_B; \\ \dot{\varphi}_B &= \omega_{ЛЗ} - \omega_{ОХ} \sin \varphi_A - \omega_{ОZ} \cos \varphi_A; \\ \omega_\xi &= \omega_{ОХ} \frac{\cos \varphi_A}{\cos \varphi_B} - \frac{\sin \varphi_A}{\cos \varphi_B} \omega_{ОZ}. \end{aligned} \quad (4)$$

Решениями уравнений (4) являются углы пеленга ЗЛВ φ_A и φ_B , которые в первом приближении определяют траекторию стабилизированного наведения ОВ.

Из формулы (3) видно, что суммарный инерционный момент вокруг оси наружной рамки СС состоит из суммы следующих моментов:

$$M_Y^{ин} = M_{Л}^{ин} + M_{О}^{ин} + M_{Л}^{ин} + M_{ЛЛ}^{ин} + M_{ОЛ}^{ин},$$

где:

$$M_{Л}^{ин} = -J_Y \dot{\omega}_{Y2} / \cos \varphi_B \quad (5)$$

– инерционный момент, вызванный угловым ускорением наведения ОВ;

$$M_{О}^{ин} = -(J_{Y1} + J_{X2}) \dot{\omega}_\xi \sin \varphi_B - (J_{X1} - J_{Y1} - J_{Z1}) \times [\omega_{ОZ} \omega_{ОХ} \cos 2\varphi_A + 0.5(\omega_{ОZ}^2 - \omega_{ОХ}^2) \sin 2\varphi_A] \quad (6)$$

– инерционный момент, вызванный качкой ЛА;

$$M_{ЛЛ}^{ин} = -(J_{Y1} + J_{X2}) \operatorname{tg} \varphi_B / \cos \varphi_B + (J_{X2} - J_{Y2}) \sin \varphi_B \omega_{ЛП} \omega_{ЛЗ} \quad (7)$$

– инерционный момент, вызванный ускорением Кориолиса при совместном наведении ОВ по двум осям;

$$M_{ОЛ}^{ин} = -(J_{Y1} + J_{X2} - J_{Z2}) \omega_\xi \omega_{ЛЗ} \cos \varphi_B - (\omega_{ОХ} \sin \varphi_A - \omega_{ОZ} \cos \varphi_A) \omega_{ЛП} \operatorname{tg} \varphi_B / \cos \varphi_B \quad (8)$$

– инерционный момент, вызванный ускорением Кориолиса при наведении на качающемся ЛА.

Заметим, что формулы (5) – (8) справедливы для случая, когда ось вращения наружной рамки СС установлена перпендикулярно продольной оси ЛА и уравнения движения записаны относи-

тельно абсолютных угловых скоростей ОВ. Если рассматриваемой переменной СС является относительный угол пеленга ОВ Φ_Y , то выражения (5) – (8) принимают следующий вид:

$$M_{\text{л}}^{\text{ин}} = -J_Y \ddot{\Phi}_Y$$

– инерционный момент, вызванный угловым ускорением пеленга ОВ;

$$M_{\text{о}}^{\text{ин}} = -J_{Y2} \dot{\omega}_{0Y} - (J_{X1} - J_{Y1} - J_{Z1})[\omega_{Oz} \omega_{Ox} \cos 2\varphi_A + 0.5(\omega_{Oz}^2 - \omega_{Ox}^2) \sin 2\varphi_A]$$

– инерционный момент, вызванный качкой ЛА.

В высокоточных СС динамические уравнения часто записывают в отклонениях ОВ от ЗЛВ. Для этих уравнений с учетом того, что $\alpha = \omega_{Y2} - \omega_{\text{лв}}$, инерционный момент в оси вращения наружной рамки, вызванный угловым ускорением наведения, имеет вид

$$M_{\text{л}}^{\text{ин}} = -(J_{Y2} \ddot{\alpha} + \omega_{\text{лв}}) / \cos \varphi_B$$

Из последних выражений видно, что угловые скорости и ускорения наведения и качки создают инерционные моменты на оси наружной рамки как непосредственно и совместным действием. Одновременно они также влияют на проекции пеленга ЗЛВ Φ_A, Φ_B , вызывая изменения инерционных моментов по величине.

Выводы по работе. В работе получены аналитические выражения для расчета инерционного момента наружной рамки двухосного карда-

нова подвеса следящей системы, работающей в режиме стабилизированного наведения на подвижном ЛА. Показано, что при угловых скоростях наведения ОВ, соизмеримых с угловыми скоростями движения ЛА в выражениях для инерционного момента наружной рамки подвеса необходимо учитывать составляющие, вызванные ускорениями Кориолиса и переменными углами пеленга ОВ.

Литература

1. Родионов В.И. Гирскопические системы стабилизации линии визирования оптических приборов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2001. – Т. 44. – № 9. – С. 36–41.
2. Родионов В.И. Анализ и синтез управляемого гиросtabilизатора при переменных углах пеленга летательного аппарата // Авиакосмическое приборостроение. Вып 3. – 2005. – С. 2–6.
3. Родионов В.И. Декомпозиция и метод исследования гирскопических систем, использующих принцип «наведение-стабилизация». // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 10. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. – С. 301–310.
4. Родионов В.И. Метод расчета инерционных моментов управляемых гиросtabilизаторов линии визирования, использующий принцип «наведение-стабилизация» // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 8. – Тула: Из-во ТулГУ, 2019. – С. 210–216.
5. Лихошерст В.В., Родионов В.И. Двухосный следящий электропривод электрооборудования летательных аппаратов // Материалы докладов 12-ой Международной научно-технической конференции, Минск, Республика Беларусь, 2019. – С. 47–49.

УДК 621.396

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ

Савёлов П.И., Лившиц Ю.Е.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Применение возобновляемых источников энергии инициировало разработку устройств генерации электричества при помощи солнечной энергии различных конструктивных исполнений.

Нами ранее была разработана конструкция мобильной солнечной электростанции (МСЭ) с функцией автоматического позиционирования солнечных батарей [1]. Система управления МСЭ разработана на базе программируемого логического контроллера (ПЛК) [2].

Целью данной работы является разработка печатного узла системы управления МСЭ для минимизации энергозатрат при функционировании в автономном режиме.

Основными функциями проектируемого печатного узла являются:

– определение географического местоположение МСЭ при помощи GPS-ГЛОНАСС модуля;

– автоматическое ориентирование мобильной электростанции относительно сторон света при помощи электронного компаса;

– управление шаговыми приводами системы позиционирования солнечных батарей;

– мониторинг в реальном времени параметров окружающей среды (скорости ветра, температуры);

– осуществление коммуникации блоков МСЭ по протоколу ModbusRTU;

– обеспечение удалённого контроля состояния МСЭ.

Разработана структурная схема печатного узла системы управления (рисунок 1).

Для обеспечения функционального назначения мобильной солнечной электростанции печатный узел системы управления состоит из следующих основных элементов: микроконтроллера, модуля GPS, модуля WiFi, модуля RS485.

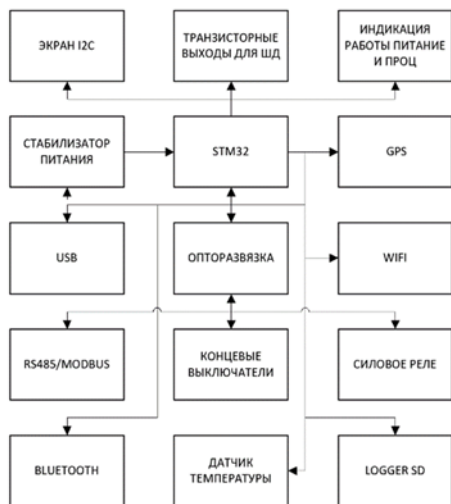


Рисунок 1 – Структурная схема печатного узла системы управления

При разработке принципиальной электрической схемы критерием выбора элементной базы являлись поверхностный монтаж компонентов, минимальные значения потребляемой электрической мощности, надёжность и электрическая совместимость компонентов. Управляющим элементом системы управления МСЭ выбран микроконтроллер STM 32. В качестве модуля GPS используется NEO-6М, для коммуникации параллельно работающим МСЭ используется WiFi модуль ESP 32.

В соответствии со структурной схемой и элементной базой разработана принципиальная электрическая схема (рисунок 2).

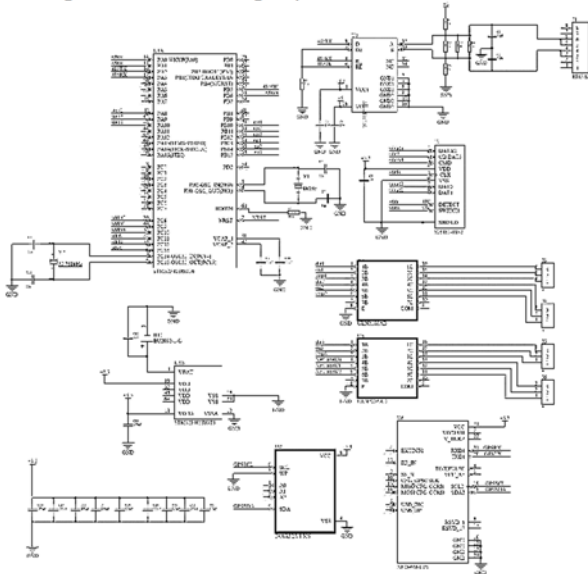


Рисунок 2 – Принципиальная электрическая схема печатного узла системы управления

Основной задачей работы являлась разработка конструкции печатного узла, имеющего минимальные массогабаритные параметры.

Для решения данной задачи конструкция разрабатывалась с учётом особенностей печатного монтажа (поверхностный монтаж) и субтрактивного метода изготовления двухслойной печатной платы.

Топологическая трассировка проводилась при помощи САПР Altium Designer и выполнялась в два этапа: размещение конструктивных элементов и трассировка электрических связей между ними [3].

Критериями оптимизации задачи размещения компонентов электрической схемы по поверхности печатной платы являлось обеспечение минимума суммарной длины всех соединений, длины самой длинной связи, числа пересечений электрических линий, максимально близкое расположение модулей, имеющих наибольшее количество связей между собой. Кроме того, элемент с максимальным числом электрических связей должен быть установлен в центральную позицию на плате, а наиболее связанные элементы расположены максимально близко друг к другу.

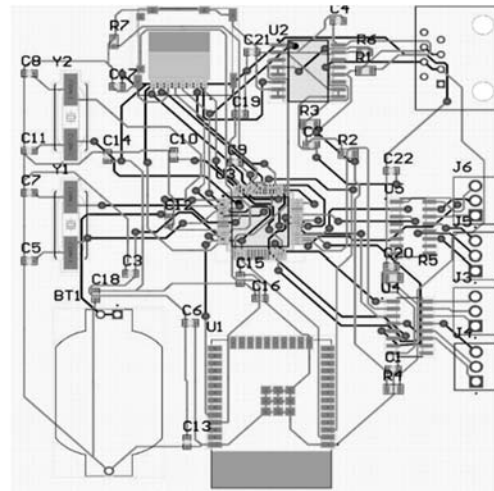


Рисунок 3 – Топология печатной платы

Это позволило сократить площадь, занимаемую проводниками, понизить уровень перекрёстных электромагнитных помех за счёт уменьшения длины проводников, их параллельности; уменьшить риск рассогласования задержек сигналов или в дифференциальном сигнале, возникающий из-за неоднородности материала печатной платы, а также снизить вероятность коробления платы при воздействии тепловых нагрузок.

Реализация задачи размещения обеспечило наилучшие условия для дальнейшей трассировки печатной платы: эффективно использовать монтажно-коммутационное пространство платы для реализации минимальных её габаритов.

Исходные данные для проведения трассировки выбраны в соответствии с общим стандартом проектирования печатных плат IPC-2221

Association Connecting Electronics Industries [4]: расстояние между проводниками – 0,1 мм, ширина токопроводящих дорожек – 0,3 мм.

Основным критерием оптимизации при выполнении трассировки печатной платы являлось соблюдение равенства линий связи в дифференциальных парах передачи данных. Трассировка производилась автоматически на основе ортогональных алгоритмов. В результате выполненной автотрассировки были выявлены два дефекта линий связи – острые углы и «клинчи» (тупиковые ситуации). Поэтому производилась корректировка результатов автоматической трассировки. Острые углы в проводниках применять недопустимо, так как они являются «кислотными ловушками», в результате чего образуются дефекты проводников. «Клинчи» устранялись перекладкой проводников вручную. Поэтому при проведении конструировании сложных печатных плат целесообразно применять «интерактивную трассировку».

В соответствии с разработанной конструкцией печатного узла (рисунок 3) сформирован gerber-файл для автоматизированного изготовления печатного узла, а также его сборочный чертёж и рабочий чертёж печатной платы, которые необходимы для выполнения контроля качества изготовления изделия.

При помощи САПР Altium Designer разработана 3-D модель печатного узла, на основе которой будет спроектирована его твердотельная мо-

дель для оценки расположения конструкции в эксплуатационном окружении и соблюдения необходимых тепловых режимов эксплуатации.

Таким образом, в результате выполненной работы разработана конструкция печатного узла и конструкторская документация для его производства.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства образования Республики Беларусь по поддержке студенческой науки (ГБ 20-23).

Литература

1. Лившиц Ю.Е. Универсальная автоматическая система управления устройством позиционирования солнечной батареи / Ю.Е. Лившиц, П.И. Савёлов // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы VII международной научно-практической конференции. Минск, 2019. – С. 64–65.
2. Савёлов П.И. Мобильная автономная солнечная электростанция / П.И. Савёлов, Ю.Е. Лившиц // Современные технологии и автоматизация в технике, управлении и образовании: материалы II международной научно-практической конференции – Балаково, 2020. – С. 123–128.
3. Лузин С.Ю. Модели и алгоритмы автоматизированного проектирования радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры / С.Ю. Лузин, Ю.Т. Лячек и др. – СПб: БХВ-Петербург, 2010. – 224 с.
4. IPC – 2221A Generic Standard on Printed Board Design. – 2003. – P. 140.

УДК 621.317.4; 621.317

ПРЕДСКАЗАНИЕ СОСТОЯНИЯ ЛИТИЕВОЙ ЯЧЕЙКИ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОЯЧЕЕЧНОЙ БАТАРЕЕЙ

Скурту И.Т., Ерошенко А.С., Брановицкий И.И.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

Эксплуатация литиевых батарей подразумевает обязательный контроль за уровнем заряда при зарядке и разрядке, а также соблюдение зарядового баланса между отдельными ячейками батареи, из которых она компонуется для достижения требуемых уровней напряжения и тока. Поддержание такого баланса в простейших случаях реализуется с помощью аналоговых следящих систем, однако в случае сложных многоячеечных батарей цена ошибки высока, поэтому необходим микропроцессорный контроль, базирующийся на модели поведения батареи.

Следует выделить основные величины и характеристики: напряжение открытой цепи или OCV (open circuit voltage), уровень заряда или состояние заряда SoC (state of charge), емкость.

OCV нелинейно зависит от SoC на границах безопасных концентраций носителей заряда.

В большей (средней) части зарядно-разрядного диапазона эта зависимость близка к линейной.

Наличие диффузионных процессов (химической инерции) приводит к зарядно-вольтовому гистерезису (OCV-SoC), отсутствие учета которого приводит к значимым ошибкам предсказания состояния батареи.

На рисунке 1 представлена эквивалентная электрическая схема литиевой ячейки, входящей в состав батарей, используемых в составе персонального электротранспорта.

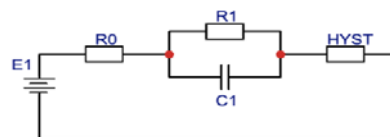


Рисунок 1 – Эквивалентная электрическая схема литий-ионной ячейки

Здесь $E1$ – идеальный источник напряжения, $R0$ – внутреннее сопротивление батареи, $R1$ и $C1$ – эквивалентные сопротивление и емкость, описывающие протекание диффузионных токов, $HYST$ – элемент задержки, воспроизводящий запаздывание между уровнем заряда и напряжением открытой цепи батареи. Каждый из этих элементов зависит от уровня заряда, состояния “здоровья” батареи, количества отработанных циклов, а также температуры батареи.

Более универсальным является метод «черного ящика» при использовании нейросети с гарантированным запасом описательной гибкости. В этом случае происходит формализация сложной зависимости в неявном виде. Преимуществом такого подхода является относительная простота реализации, универсальность, достаточная точность предсказания при балансировке. Экспериментальные данные необходимые для обучения и переобучения модели собираются непосредственно во время работы батареи в составе ПЭТС. Недостатком является необходимость оснащения BMS более мощными вычислительными ресурсами.

В качестве примера структуры с достаточной описательной способностью можно привести авторегрессионную однослойную нейронную сеть, схема которой представлена на рисунке 2.

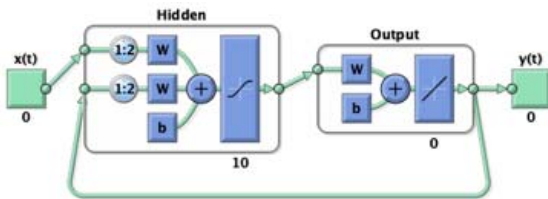


Рисунок 2 – Авторегрессионная нейронная сеть для описания литий-ионной ячейки

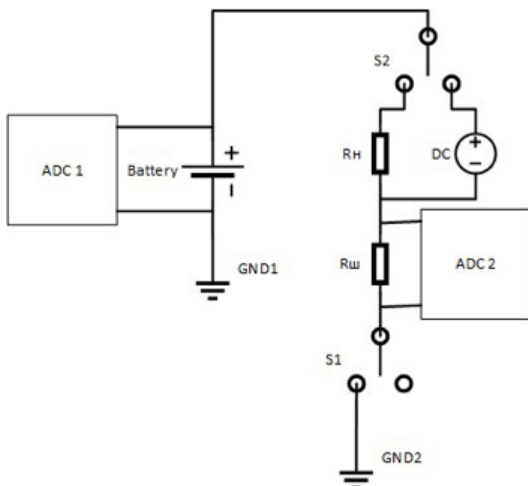


Рисунок 3 – Структурная схема макета для экспериментального исследования зарядно-разрядных циклов литий-ионной ячейки

Данная сеть имеет два входа, на которые поступают отсчеты тока, через ячейку, а также

напряжения ячейки, которые затем задерживаются на два отсчета для учета влияния динамических факторов и фазовых соотношений процесса. На таких данных сеть способна обучаться, а для предсказаний в реальном времени, необходимо установить обратную связь между выходом и входом, чтобы предсказанные отсчеты напряжения могли выступать в качестве входных данных.

Для использования в составе ПЭТС ячейки объединяют, соединяя их последовательно и параллельно в количестве и конфигурации, обеспечивающих требуемые показатели по напряжению и току.

В случае параллельного соединения ячеек уместно говорить уже об объединенной модели секции, поскольку напряжения отдельных ячеек в секции находятся на одном уровне, несмотря на естественный разброс внутренних параметров. Это приводит к изменению эквивалентных параметров секции, однако не меняет описательной сложности ее поведения в зарядно-разрядных циклах.

Последовательное соединение ячеек или параллельных секций требует наличия отдельной модели для каждого такого элемента. Имея одинаковое значение тока (что уменьшает количество необходимых датчиков тока до одного), такое соединение может быть формализовано как несколько параллельных вычислительных потоков, каждый из которых обслуживает потребности конкретной нейронной сети, отвечающей за предсказание напряжения каждого из последовательно соединенных участков.

Важно отметить, что с течением времени необходимо переобучать сеть, поскольку с каждым зарядно-разрядным циклом параметры ячеек необратимо меняются. Типовые ситуации переобучения возникают, например: через определенное количество циклов; при значимых изменениях температуры окружающей среды (единицы градусов); при замене ячеек; при фиксации в реальном времени значимой разницы между предсказанными и измеренными значениями. Переобучение сетей может представлять собой и непрерывный процесс.

В зависимости от числа последовательно включенных секций, модель батареи в целом может рассматриваться как “сумма” моделей отдельных ячеек, при этом целесообразно выделить отдельную нейросеть для анализа и описания обобщенного поведения. Ее показания могут являться дополнительным триггером, запускающим переобучение сетей.

Для оценки описательной способности нейронной сети был разработан макет установки для получения экспериментальных данных при работе ячейки в различных режимах. Его структурная схема приведена на рисунке 3.

Ячейка может исследоваться на макете в трех режимах: *a* – открытая цепь (правое положение реле S1); *b* – разряд через резистор Rn (левое положение S2 и S1); *в* – заряд (правое положение S2 и левое S1). Источник постоянного напряжения DC заряжает батарею напряжением 4.2 В.

На рисунке 4 представлен исходный сигнал напряжения на выходе батареи при нагрузочном тестировании и его приближение, полученное с помощью нейросети на этапе обучения. Сигналы идентичны в высокой степени. Пики ошибок достигают двух процентов. В целом же, на основной протяженности сигнала, они составляют порядка половины процента.

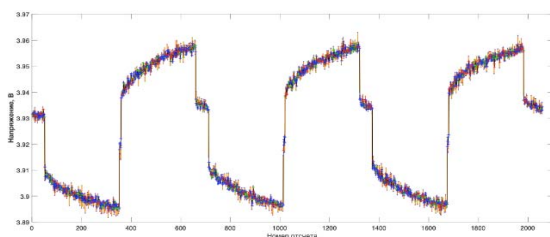


Рисунок 4 – Сигнал напряжения на выходе батареи при нагрузочном тестировании и его приближение, полученное с помощью нейросети на этапе обучения

Следует отметить, что представленная выборка включает в себя лишь несколько периодов заряда-разряда и хорошо подходит для кратко-

срочного прогнозирования. Отдельно следует выделить работу с большими циклами (полный заряд-разряд батареи) и работу на участках насыщения (сверху и снизу), где небольшим изменениям заряда соответствуют значительные изменения напряжения.

Использование модели на основе регрессионной нейронной сети непосредственно во время работы электрического транспортного средства позволяет получать необходимую информацию о состоянии ячейки батареи в ближайшее время (до 4000 секунд для приведенной конфигурации) при текущем нагрузочном профиле, а также при его вариациях.

На основе этой информации алгоритмы системы управления батареями электрического транспортного средства могут принимать более эффективные в долгосрочном периоде решения по балансировке ячеек. При этом нейронная сеть замыкается таким образом, что предсказанные ею данные о напряжении ячейки подаются обратно на вход вместе с новыми отсчетами тока согласно выбранному нагрузочному профилю. Предсказательная способность такой системы ограничена в силу накопления ошибки. С течением времени расхождение между предсказанной последовательностью и реальным напряжением возрастает.

УДК 621.317.08

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН МЕТОДОМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ Смирнова Н.В.¹, Пономарев А.В.²

¹Севастопольский государственный университет
Севастополь, Российская Федерация

²Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова
Ижевск, Российская Федерация

Электрические машины разнообразного назначения находят самое широкое приложение при создании объектов производственной инфраструктуры в различных предметных областях, в том числе и в приборостроении. При этом задача разработки новых и совершенствования существующих методов и средств функционального диагностирования электрических машин: электрогенераторов, электродвигателей, инверторов, электромашинных усилителей, индукционных регуляторов, является важной и актуальной задачей.

В настоящее время разработан значительный арсенал методов функционального диагностирования электрических машин, которые по физической сущности анализируемого информационного процесса можно разбить на следующие группы:

1. Анализ вибрационных и акустических сигналов, генерируемых функционирующей электрической машиной.

2. Анализ магнитных потоков, создаваемых функционирующей электрической машиной.

3. Анализ электромагнитных и температурных полей.

4. Исследование электрических параметров (динамики изменений тока, напряжения и потребляемой мощности) электрической машины в процессе ее работы.

Отметим, что каждый из существующих методов функционального диагностирования электрических машин, обладая своими достоинствами и недостатками, имеет и свою наиболее результативную область приложения. Например, недостатком метода анализа виброакустического сигнала является требование непосредственного доступа к электрической машине, выполнение которого часто просто невозможно, например, на АЭС.

Наиболее перспективными методами функционального диагностирования электрических машин является методы пятой группы.

Эти методы основаны на следующей простой физической гипотезе, согласно которой те или иные неисправности (электрические и/или механические) электрической машины и связанного с ней оборудования должны вызывать изменения магнитного потока. Изменения магнитного потока, в свою очередь, должны вызывать изменения тока, напряжения, потребляемой (генерируемой) мощности функционирующей электрической машины. Как показали экспериментальные исследования, эта гипотеза блестяще подтверждается на практике.

Существенными преимуществами пятой группы методов функционального диагностирования, в сравнении с другими группами, является, во-первых, отсутствие необходимости обеспечения доступа к объекту диагностирования, и, во-вторых, возможность функционального диагностирования как электрической, так и механической частей электрической машины, а также связанного с ней механического оборудования. В этой группе методов для решения задачи функционального диагностирования объекта исследуется гармонический состав энергетических спектров электрических сигналов электрических машин (сигналов напряжения, тока, потребляемой (вырабатываемой) мощности), анализируется спектральный состав амплитуды и фазы вектора Парка. Методами анализа электрических сигналов функционирующих (работающих) электрических машин можно с высокой достоверностью диагностировать статический и динамический эксцентриситет, несоосность валов, обрыв стержней, дефекты подшипников, дефекты обмоток статора.

В настоящее время развитие методов и средств диагностирования сложных объектов, в том числе и электрических машин, происходит на основе внедрения цифровых технологий (Digital Technologies – DT – технологий) [1]. В результате внедрения – DT – технологий был запущен процесс цифровизации функционального диагностирования объектов – процесс перехода при диагностировании объектов от методов аналоговой обработки сигналов (АОС) к методам цифровой обработки сигналов (ЦОС). Отметим, что процессы АОС и ЦОС имеют много общего, но имеют и существенные отличия, не учет которых может приводить к серьезным ошибкам.

Переход от АОС к ЦОС в процессе цифровизации функционального диагностирования на основе энергетических спектров электрических сигналов электрических машин базируется на дискретном преобразовании Фурье.

Прямое дискретное преобразование Фурье (ДДФ) (алгебраическая форма).

$$S_N(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn}; \quad (1)$$

$$W_N = \exp(-j \frac{2\pi}{N}), \quad k = \overline{0, (N-1)},$$

где $x(n)$ – электрический дискретный сигнал, заданный в виде последовательности на N – интервале, т. е. $n = \overline{0, N-1}$, $W_N^{kn} = \text{def}_N(k, n)$, $k = \overline{0, (N-1)}$, $n = \overline{0, (N-1)}$ – дискретные экспоненциальные функции (ДЭФ), $S_N(k)$ – бины ДДФ.

Обратное дискретное преобразование Фурье (ОДФ) (алгебраическая форма).

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} S_N(k) W_N^{-kn}. \quad (2)$$

Отметим три важных момента относительно ДДФ.

Во-первых, несмотря на то, что сигнал $x(n)$ и спектр $S_N(k)$ заданы на N – интервалах, они (сигнал и спектр) периодически продолжаются на всю временную и частотную оси соответственно. Свойство периодичности ДДФ объясняется тем, что ДДФ равно дискретно-временному преобразованию (ДВПФ) периодического дискретного сигнала. Отметим, что если сигнал периодичен, то его спектр, полученный методом ДДФ, дискретен. Если спектр сигнала периодичен, то сигнал, полученный методом обратного ДДФ, дискретен. Если сигнал дискретен, то спектр периодичен, а если спектр дискретен, то сигнал периодичен.

Во-вторых, k – значение бина (коэффициента) ДДФ является линейным косвенным измерением бина ДДФ

В-третьих, погрешность γ измерения частоты гармонической составляющей сигнала методом ДДФ равна половине расстояния Δf между соседними бинами ДДФ в энергетическом спектре $G_N(k)$:

$$G_N(k) = N \cdot |S_N(k)|^2; \quad \gamma = \Delta f / 2; \quad \Delta f = F_D / N, \quad (3)$$

где F_D – частота дискретизации сигнала $x(n)$.

Теоретический и экспериментальный анализ ДДФ выявил ряд негативных эффектов, сопровождающих его применение. Это, прежде всего, эффекты утечки, наложения и частотола. Можно показать, что негативные эффекты ДДФ функционально связаны со свойствами его базиса и вытекают из природы дискретного преобразования Фурье.

С точки зрения функционального диагностирования электрических машин наиболее нежелателен эффект частотола ДДФ, поскольку он не позволяет получить ответ на вопрос: каковы значения энергетического спектра между бинами ДДФ? В силу того, что спектральный анализ для качественной диагностики электрических машин необходимо проводить с погрешностью не более

0,01–0,02 Гц, необходимо каким-то образом увеличивать число бинов ДПФ. Для решения выявленной проблемы предложено обобщение ДПФ в виде параметрического дискретного преобразования Фурье (ДПФ-П).

Прямое ДПФ-П (матричная форма).

$$S_{N,\theta} = \frac{1}{N} F_{N,\theta} X_N; \quad 0 \leq \theta < 1; \quad (4)$$

где $X_N = [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T$ – задание дискретного сигнала $x(n)$, $n = 0, \overline{N-1}$, в виде вектора N -мерного линейного пространства; T – знак транспонирования;

$S_{N,\theta} = [s(0, \theta), s(1, \theta), \dots, s((N-1), \theta)]^T$ – вектор бинов ДПФ-П, полученных путем измерения спектра в системе параметрических дискретных экспоненциальных функций (ДЭФ-П), которая задается матрицей $F_{N,\theta}$.

$$F_{N,\theta} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & \dots & (N-1) \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ (N-1) \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & W_N^\theta & \dots & W_N^{\theta(N-1)} \\ 1 & W_N^{(1+\theta)} & \dots & W_N^{(1+\theta)(N-1)} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 1 & W_N^{(N-1+\theta)} & \dots & W_N^{(N-1+\theta)(N-1)} \end{bmatrix} \end{matrix} \end{matrix}; \quad (5)$$

УДК 621.3.049

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ С СОВМЕЩЕНИЕМ ПРОЦЕДУР КАЛИБРОВКИ

Воробей Р.И.¹, Гусев О.К.¹, Свистун А.И.¹, Тявловский К.Л.¹, Шадурская Л.И.¹, Жуковский П.В.², Тявловский А.К.¹

¹Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

²Люблинский технический университет

Люблин, Польша

Сущность оптических методов заключается в регистрации абсолютной и относительной интенсивностей спектральных линий, полуширины, формы контуров спектральных линий и т.п. Важной задачей при разработке принципов построения систем оптической диагностики является оценка возможностей первичных преобразователей системы на основе фотоэлектрических преобразователей. Расширение функциональности измерительных приборов и систем технической диагностики связано с применением оптико-электронных элементов, в частности, оптических волоконных чувствительных элементов [1–3], а также фотодетекторов с расширенными функциональными возможностями [4]. Их применение в контроле производственных процессов и изделий связано с рядом преимуществ:

- химическая инертность;
- малый вес и размеры;

где ДЭФ-П определяются следующим соотношением:

$$def_{N,p}(k, n, \theta) = W_N^{(k+\theta)n} = \exp\left[-j \frac{2\pi}{N} (k + \theta)n\right];$$

$$k = \overline{0, (N-1)}, \quad n = \overline{0, (N-1)}, \quad 0 \leq \theta < 1.$$

В работе доказано, что для уменьшения погрешности измерения частот гармонических компонент сигнала в R раз, применение БПФ-П в сравнении с БПФ позволяет сократить число операций в $\frac{(\log_2 N + \log_2 R)}{\log_2 N}$ раз, а по необходи-

мому объему оперативной памяти в R раз.

Одно из актуальных приложений предложенного метода технического диагностирования – применение в современных системах автоматизированной интеллектуальной диагностики электрических машин.

Литература

1. Systems Analysis of Discrete Two-Dimensional Signal Processing in Fourier Basis // Advances in Signal Processing. Theories, Algorithms, and System Control. Editor: Margarita Favorskaya, Lakmi C. Jain. // Springer, 2020.

- нечувствительность к электромагнитным помехам и возмущениям, отсутствие генерируемых электромагнитных помех, способных влиять на другие цепи;

- безопасность эксплуатации, ввиду электрической изоляции и малой мощности оптического излучения;

- устойчивость и надежность, определяющие малые эксплуатационные затраты.

Дополнительные преимущества обеспечивает возможность интегрирования в одну систему оптического волоконного сенсора и волоконно-оптической линии связи [5].

В общем случае выходной сигнал оптического сенсора является сигналом со случайными нефиксированными параметрами различной физической природы, изменяющимися в некотором диапазоне значений. Большинство оптических сенсоров для определения значения измеряемой

величины используют изменение плотности мощности оптического излучения. Следовательно, для реализации измерений с малой погрешностью необходимо высокоточное измерение интенсивности оптического излучения, попадающего на фотодетектор. Однако величина выходного сигнала оптического чувствительного элемента, кроме воздействия измеряемой физической величины, может изменяться и по другим причинам:

– Интенсивность излучения источника света изменяется в зависимости от температуры и срока службы. Например, на интенсивность излучения ламп существенно влияет старение нити накаливания и напряжение питания, изменение оптических свойств баллона лампы. Светодиоды имеют значительный срок службы, но интенсивность их оптического излучения существенно зависит от температуры и изменяется в процессе эксплуатации вследствие деграционных процессов. Кроме того, изменение напряжения питания приводит к изменению спектрального распределения интенсивности излучения.

– На оптические компоненты схемы могут воздействовать различные внешние факторы, например, механические.

– Чувствительность приемника и интенсивность излучения источника света характеризуются большими технологическими разбросами, меняются вследствие температурных факторов, а также зависят и от длины волны.

На погрешность измерения влияют и ряд других факторов, причем, в различных сочетаниях. Наличие совокупности некоррелированно изменяющихся дестабилизирующих факторов приводит к значительному увеличению погрешности измерений и ошибкам контроля в системах оптической диагностики. Часто введение мер по стабилизации режимов функционирования излучателя и приемника недостаточно для снижения погрешности измерения. Следовательно, для достижения высоких метрологических характеристик оптических сенсоров в оптико-электронных узлах измерительных систем необходимо использовать процедуру сравнения или калибровки (эталонирования) непосредственно в процессе измерения. Для уменьшения ошибок преобразования разработано несколько схем [3, 6]. Системы калибровки сенсоров в процессе измерения используют какой-либо вид измерения отношений (рисунок 1).

В качестве сенсоров в измерительных преобразователях систем оптической диагностики могут использоваться различные пассивные и активные чувствительные элементы [1–4], а измеряемая величина M может иметь и оптическую природу. В этом случае, в качестве измерительного сигнала может использоваться оптический сигнал S_1 . Известно большое число разновидно-

стей фотоэлектрических сенсоров, в том числе, обладающих функциональными свойствами, и позволяющими одновременно измерять несколько контролируемых воздействий различной физической природы [1–4, 6].

Схемы калибровки двойного детектирования (рисунок 1, а), двухволновая схема с широкополосным источником (б), двухволновая схема с двумя источниками (в) используют либо два источника оптического излучения, либо два фотодетектора, либо измерения производятся с мультиплексированием по длине волны излучения. При использовании функциональных датчиков измеряемая величина M может иметь различную физическую природу, а в качестве дополнительной измеряемой величины или управляющим свойствами сенсора воздействием могут использоваться сигналы S_1, S_2 [4]. Также на рисунке 1 приведены: D – фотодетектор, F – оптические фильтры, Y – оптические разветвители.

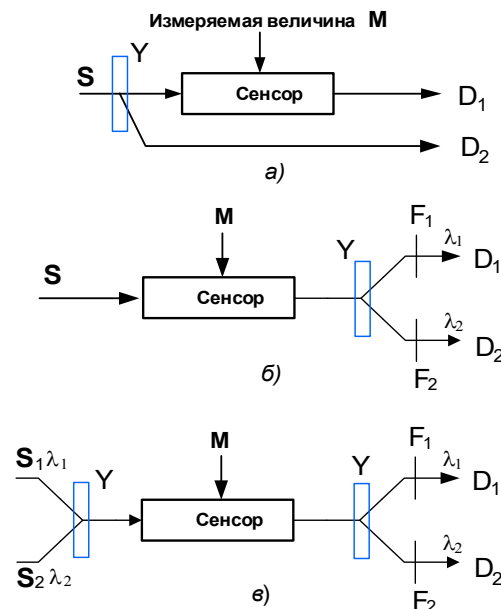


Рисунок 1 – Схемы калибровки сенсоров

Отметим, что все схемы автокалибровки требуют применения фотодетекторов D_1 и D_2 с идентичными характеристиками. Кроме того, введение в схему калибровки-измерения дополнительных оптических элементов F, Y также предъявляет повышенные требования к стабильности их параметров. Рассмотренные системы требуют применения либо двух фотоприемников, либо двух источников оптического излучения, что предъявляет высокие требования к идентичности их параметров, стабильности характеристик, усложняет оптическую схему. При этом погрешность измерения в первую очередь определяется идентичностью и временной стабильностью параметров фотодетекторов D_1, D_2 , поэтому в качестве фотодетекторов целесообразно

но использовать элементы интегрального многоэлементного фотоприемника. Дополнительным требованием к системе совмещенной калибровки- измерения является превышение быстродействия фотодетекторов скорости изменения входного воздействия, что позволяет считать измерения статическими.

При оценке погрешности процедур измерения и калибровки оптических сенсоров необходимо учитывать следующие факторы: ΔS – погрешность, вносимая изменением плотности мощности источника света, $\Delta \lambda$ – погрешность, вносимая изменением длины волны источника света, ΔT – погрешность, вносимая отклонением температуры и других внешних факторов от номинальных значений, ΔS_{D1} и ΔS_{D2} – погрешности калибровки первого и второго фотоприемников по плотности мощности, $\Delta \lambda_{D1}$ и $\Delta \lambda_{D2}$ – погрешности калибровки первого и второго фотоприемников по длине волны, ΔP_{D1} и ΔP_{D2} – погрешности, вносимые преобразователями сигналов первого и второго фотоприемников в электрический сигнал, Δk_1 и Δk_2 – мультипликативные составляющие погрешности первого и второго фотоприемников. Следует также учесть, что величины ΔS_{D1} , ΔS_{D2} , $\Delta \lambda_{D1}$, $\Delta \lambda_{D2}$, ΔP_{D1} и ΔP_{D2} являются независимыми случайными величинами, а их объединения подчиняются нормальному закону распределения вероятностей. Таким образом, математическая модель погрешности процедуры калибровки может быть записана как $\Delta M = \Delta k_2 M + (\Delta S_{D2} * \Delta \lambda_{D2} * \Delta P_{D2}) * (\Delta S_{D1} * \Delta \lambda_{D1} * \Delta P_{D1})$. Отсюда следует, что схемы двойного детектирования (рисунок 1, а, б) обеспечивают компенсацию возмущающих воздействий, действующих на входе средства измерений, но при этом вносятся дополнительные составляющие в аддитивную погрешность результата измерения, обусловленные обобщенным возмущающим воздействием, действующим на выходе средства измерений, а мультипликативная составляющая погрешности остается неизменной. Схема с двумя источниками (рисунок 1, в) аналогичным образом увеличивает аддитивную погрешность результата измерения, обусловленную обобщенным возмущающим воздействием на входе средства измерений.

Указанные недостатки традиционных методов частично или полностью могут быть устранены путем реализации процедуры многопараметрических измерений на основе односигнальной модели [6] с использованием двухбарьерных [7] одноэлементных фотодетекторов (рисунок 2).

Поверхностно-барьерные структуры с двумя потенциальными барьерами с глубокими многозарядными примесями в ОПЗ, сформированные с противоположных сторон приборной структуры, и образующие два встречно включенных диода Шоттки, разделенных длиной базой, демон-

стрируют зависимость выходного сигнала от длины волны, интенсивности излучения, величины приложенного напряжения [8].

Приборная структура фотоприемника содержит несколько физически различных и электрически связанных областей, а использование процессов в такой структуре обеспечивает многофункциональность фотоприемника за счет формирования выходного сигнала, связанного с изменением нескольких входных параметров [4, 6–7].

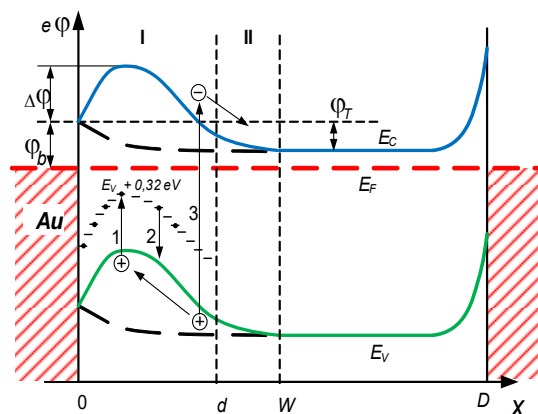


Рисунок 2 – Структура двухбарьерного фотоприемника с внутренним усилением в области I

Существенной особенностью двухбарьерных фотодетекторов является инверсия знака спектральной характеристики чувствительности приемника оптического излучения на некоторой длине волны λ_0 (рисунок 3), причем значение λ_0 для конкретного фотоприемника не зависит от интенсивности оптического излучения.

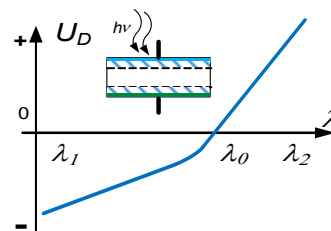


Рисунок 3 – Передаточная характеристика измерительного преобразователя на базе двухбарьерного фотоприемника

Значение длины волны инверсии знака спектральной характеристики и диапазон длин волн чувствительности двухбарьерного фотоприемника λ_0 , λ_1 , λ_2 определяются технологией и материалом, на основе которого изготавливается приемник [4, 7]. Типичный реализуемый диапазон измерения длины волны составляет для разных фотоприемников от 1,2 до 2,4 мкм. Конкретные диапазоны и коэффициенты преобразования определяются типом материала основного материала, материала примеси, конструктивно-технологических характеристик. Кроме того,

положение характерных точек $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$ на спектральной характеристике чувствительности может быть изменено регулировкой напряжения смещения фотодетектора.

Естественно, что при выборе параметров источников сигнала S , для обеспечения максимального динамического диапазона преобразователя и минимальной погрешности процедур измерения/калибровки необходимо подобрать их параметры так, чтобы значения длин волн излучения источника света были как можно ближе к экстремумам спектральной характеристики двухбарьерного фотоприемника [4, 6].

Использование двухбарьерного фотодетектора приводит к двум схемам калибровки (рисунок 4) измерительных преобразователей систем оптической диагностики, основанных на традиционных двухволновых схемах калибровки (рисунок 1).

Схема с широкополосным источником (рисунок 4, а) использует один источник и один фотодетектор и не содержит каких-либо дополнительных оптических элементов. В схеме рисунок 4, а используются электрические фильтры F_{E1} и F_{E2} , осуществляющие разделение электрических сигналов, соответствующих длинам волн λ_1 и λ_2 . При этом, на одной из длин волн оптического излучения, например, λ_1 , производится измерение величины параметра M , а на другой длине волны – λ_2 осуществляется калибровка фоточувствительного сенсора. Излучение на длине волны λ_0 может использоваться для процедуры калибровки самого двухбарьерного фотодетектора и схем обработки сигналов фотодетектора. Использование в процедурах измерения и калибровки одних и тех же оптических элементов исключает влияние разброса параметров оптических элементов на погрешность измерения.

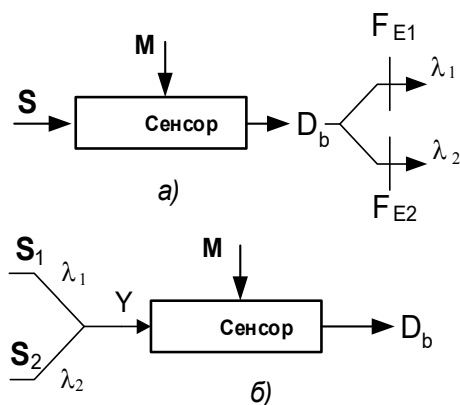


Рисунок 4 – Двухволновая схема с широкополосным источником (а); двухволновая схема с двумя источниками (б) калибровки измерительного преобразователя с использованием двухбарьерного фотоприемника

В процессе измерения с калибровкой производится анализ соотношений двух измерительных

сигналов на разных длинах волн при использовании широкополосного или двухволнового источника оптического излучения. Отметим, что определение параметров оптического излучения на разных длинах волн производится в одном и том же элементе приемника, что исключает влияние неидентичности характеристик фотодетекторов на погрешность измерений в схемах, приведенных на рисунке 1. Процедура калибровки производится с разделением по времени.

В отличие от традиционных схем калибровки применение двухбарьерного фотодетектора приводит к тому, что оба измерительных канала реализуются в одних и тех же конструктивных элементах. Один и тот же объем полупроводниковой структуры двухбарьерного фотодетектора используется при формировании измерительных сигналов на длинах волн λ_1 и λ_2 . При этом, применение двухбарьерного фотоприемника, благодаря разнополярности отклика на длинах волн λ_1 и λ_2 и идентичности характеристик фотоприемника при обработке сигналов S_1 и S_2 (используется один и тот же объем сенсорной структуры), аналогично применению в электрической эквивалентной схеме дифференциального усилителя. Математическое описание модели составляющих погрешности измерительного преобразователя с двухбарьерным фотодетектором приводится к виду

$$\Delta M = (\Delta k_1 - \Delta k_2) M + (\Delta S_2 * \Delta \lambda_2 * \Delta P_2) - (\Delta S_1 * \Delta \lambda_1 * \Delta P_1),$$

где * – символ объединения погрешностей, $\Delta S_1, \Delta \lambda_1, \Delta P_1$ и $\Delta S_2, \Delta \lambda_2, \Delta P_2$ – составляющие погрешности фотоприемника при измерениях на длине волны λ_1 и λ_2 соответственно; Δk_1 и Δk_2 – мультипликативные составляющие погрешности средства измерений на этих же длинах волн. Для независимых погрешностей объединение определяется как корень квадратный из суммы квадратов их относительных величин. В данном случае перечисленные величины не являются независимыми, поскольку характеризуют один и тот же двухбарьерный фотодетектор. В случае если в этих погрешностях преобладает систематическая составляющая, их можно считать коррелированными с коэффициентом корреляции, стремящемся к единице, что позволяет заменить символ объединения символом арифметической разности. Тогда погрешность калибровки и измерения сенсора на базе двухбарьерного одноэлементного фотоприемника оказывается меньшей, чем погрешность традиционных методов с использованием отдельных элементов. Составляющие погрешности фоточувствительного сенсора, вызванные неидентичностью характеристик фотодетекторов исключаются. Исключаются также погрешности, связанные с градиентом распределения внешних факторов, например, температуры между чувствительными элементами фотодетектора. В двухбарьерном фотодетекторе измерение

параметров оптического излучения на различных длинах волн производится в одном и том же физическом объеме чувствительного элемента. При выборе пары источник оптического излучения – фотодетектор для обеспечения максимального динамического диапазона преобразователя и минимальной погрешности измерения необходимо подобрать их параметры так, чтобы значения длин волн излучения источника света были как можно ближе к экстремумам спектральной характеристики двухбарьерного фотодетектора [4].

Применение двухбарьерных фотоприемников в схемах измерительных преобразователей систем оптической диагностики позволяет реализовать процедуру калибровки непосредственно в процессе измерения.

Схемы калибровки измерительных преобразователей систем оптической диагностики с двухбарьерным фотодетектором позволяют исключить ряд погрешностей, связанных с неидентичностью отдельных фотодетекторов и элементов различных оптических измерительных каналов, существенно уменьшить другие составляющие погрешности измерения.

Применение одноэлементных двухбарьерных фотодетекторов в схемах калибровки измерительных преобразователей систем оптической диагностики позволяет исключить диспергирующие элементы, что приводит к упрощению оптической схемы измерения с одновременным улучшением метрологических характеристик измерительных преобразователей систем оптической диагностики.

УДК 629.3.05:629.762

ПИЛОТАЖНО-НАВИГАЦИОННЫЙ МОДУЛЬ СО ВСТРОЕННЫМ АЛГОРИТМОМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИЕЙ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПО СИГНАЛАМ ОТ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Черняковский Д.Н., Односторонцев А.А., Михайлов А.О., Фёдорцев Р.В., Морошек П.М., Белов А.В.

ООО «НТЛаб-ИС»

Минск, Республика Беларусь

Процесс управления скоростными воздушными объектами с быстроменяющейся траекторией движения предусматривает решение комплекса взаимосвязанных задач, связанных со стабилизацией его движения и корректировкой направления полёта. Одним из таких исполнительных изделий является – пилотажно-навигационный модуль (ПНМ) (рисунок 1).

Для контроля и диагностики входящих в изделие элементов и антенного модуля, собирався стенд, представленный на рисунке 2. ПНМ и излучающую антенну располагали в безэховой камере.

При проведении стендовых испытаний по оценке функциональности работы данного изде-

Литература

1. Масол, И.В. Информационные нанотехнологии / И.В. Масол, В.И. Осинский, О.Т. Сергеев – Киев: изд-во Макрос, 2011. – 560 с.
2. Ермаков, О.Н. Прикладная оптоэлектроника / О.Н. Ермаков. – М.: Техносфера, 2004. – 416 с.
3. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.
4. Гусев О. К., Тявловский К. Л., Воробей Р. И., Свистун А. И., Шадурская Л. И. Фотоприемники на основе собственных полупроводников для построения измерительных преобразователей. // Метрология и приборостроение. – 2017, № 2. – С.34–42.
5. Окоси Т. и др. Волоконно-оптические датчики. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
6. Гусев, О.К. и др. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными состояниями. / О.К. Гусев, Р.И. воробей, А.Л. Жарин, А.И. Свистун, А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский; под общ ред. О.К. Гусева – Минск: БНТУ, 2010. – 582 с.
7. Vorobey, R.I. Photoelectric semiconductor converters with a large dynamic range / R.I. Vorobey, O.K. Gusev, A.K. Tyavlovsky, K.L. Tyavlovsky, A.I. Svistun, L.I. Shadurskaya, N.V. Yarzhembitskaya, K. Kierczynski // Przegląd elektrotechniczny, – Nr 5. 2014, – Pp. 75–78.
8. Воробей, Р.И. Измерительные преобразователи систем оптической диагностики с многофункциональными фотоприемниками / Р.И. Воробей, О.К. Гусев, А.И. Свистун, А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский, Л.И. Шадурская // Приборы и методы измерений, 2018. № 3. – С. 215–226.
9. Назаров Н. Г. Метрология. Основные понятия и математические модели. – М.: Высш. шк., 2002. – 348 с.

лия осуществляется оценка следующих выходных показателей:

- геодезические координаты (WGS-84);
- проекции вектора скорости;
- угловая ориентация и угловые скорости изделия;
- режим работы и статус внутренних модулей;
- отношение сигнал/шум для каждого спутника.

При формировании сигналов ГНСС в качестве имитатора использовался Spirent GSS6700 работающий на частоте L1 из одного шасси. Приёмник сигналов спутниковой навигационной системы (СНС) должен обеспечивать поиск и захват сигналов GPS, ГЛОНАСС, GALILEO,

BeiDou с заданными в интерфейсных контрольных документах характеристиками при изменении мощности сигнала на входе антенной системы в диапазоне от -136 до -110 дБмВт. ПНМ должен обеспечивать возможность определения спутниковым модулем геодезических координат WGS-84, составляющих вектора скорости и углов пространственной ориентации изделия при наличии сигналов хотя бы одной из спутниковых систем и проведения начальной выставки, а также начала выполнения коррекции по СНС для активных навигационных систем за время, не превышающее 150 с.

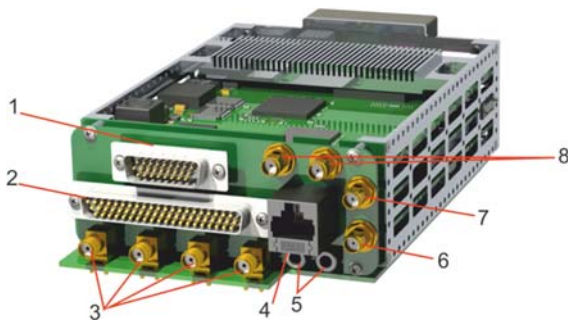


Рисунок 1 – Внешний вид ПНМ:

- 1 – разъём целевой нагрузки;
- 2 – разъём управления БЛА/БНМ;
- 3 – разъёмы антенн высокоточного приёмника спутниковой навигации и ориентации;
- 4 – разъём бортового устройства регистрации;
- 5 – фитинги CBC;
- 6 – разъём антенны приёмника сигналов СРНС ГЛОНАСС/GPS/Galileo/BeiDou;
- 7 – разъём антенны передатчика видеосигнала;
- 8 – разъём антенны приёмопередатчика телеметрии и управления

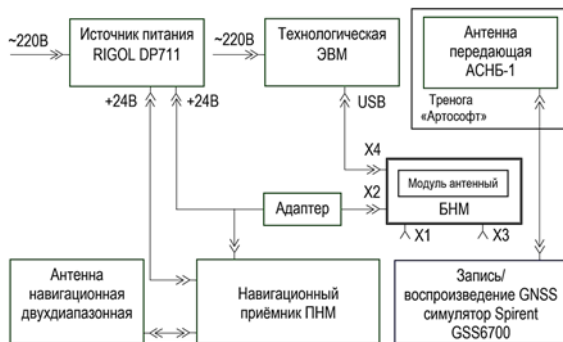


Рисунок 2 – Схема стенда для проведения функционального контроля и диагностики ПНМ

В основу работы алгоритма автоматической коррекции заложен метод интеграции (комплексирования) спутниковых радионавигационных систем (СРНС) и бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), которые работают независимо друг от друга, но содержат блок обработки и коррекции входных сигналов посредством интегрального фильтра Калмана.

Проверялась возможность функционирования бесплатформенной инерциальной навигационной

системы по данным блока чувствительных элементов МЭМС STIM300 с возможностью проведения начальной выставки по заданным координатам и курсу или по данным, измеренным приёмником СНС, и заданному курсу, а также функционирования алгоритма комплексной обработки данных СНС и БИНС.

Получены результаты измерений при использовании глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) в комбинированном варианте GPS, ГЛОНАСС. Время начала выполнения коррекции по СНС при максимальном уровне мощности сигнала захвата и слежения составило 0,51 с (рисунки 3 и 4).

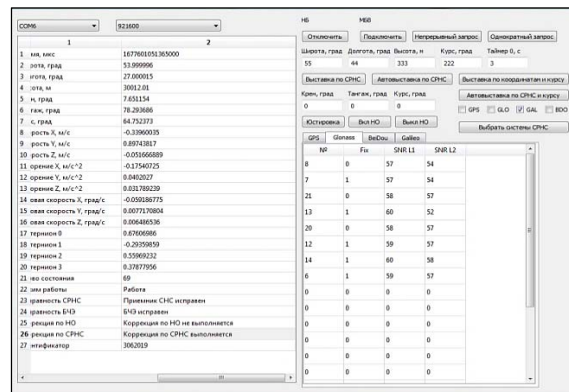


Рисунок 3 – Результаты контроля выходных данных ПНМ при работе по сигналам GPS, ГЛОНАСС при максимальном уровне мощности захвата и слежения

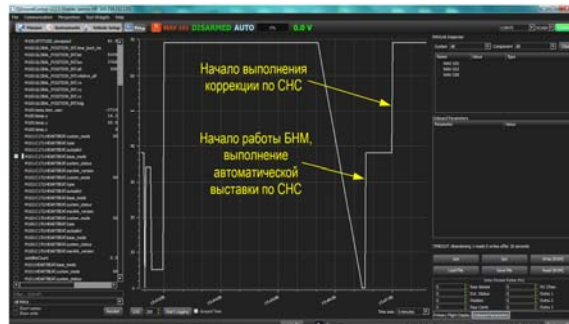


Рисунок 4 – Контроль выполнения коррекции по СНС при работе по сигналам от GPS, ГЛОНАСС и при максимальном уровне мощности захвата и слежения

Время начала выполнения коррекции по СНС при минимальном уровне мощности сигнала захвата составило 0,57 с (рисунки 5 и 6).

Результаты контроля признака коррекции по СНС после установки минимального уровня мощности сигнала на входе антенной системы ПНМ соответствующего минус 143 дБмВт.

Первое навигационное решение после подачи питания появилось через 63 с. Непосредственно после начала внесения преднамеренных ошибок по псевдодальностям в течении 3 с наблюдалось отсутствие признака коррекции по СНС, что яв-

ляется допустимым. Далее признак восстановился и не пропал.

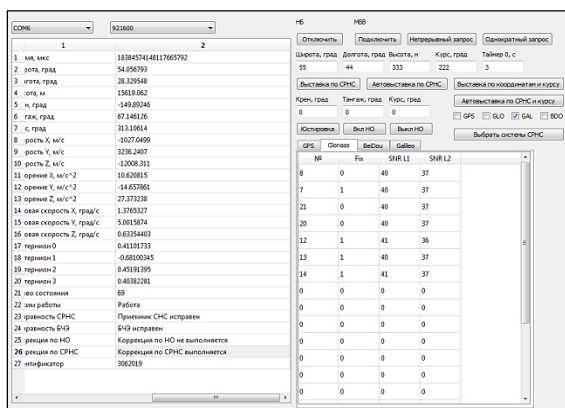


Рисунок 5 – Результаты контроля выходных данных ПНМ при работе по сигналам GPS, ГЛОНАСС при минимальном уровне мощности захвата

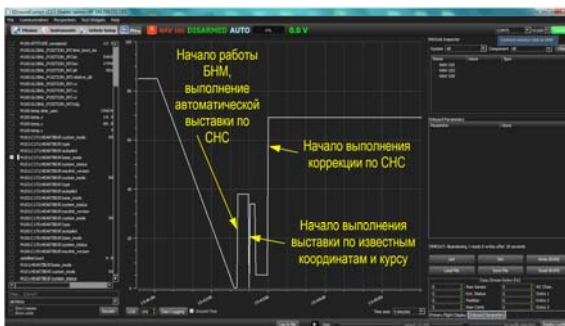


Рисунок 6 – Контроль выполнения коррекции по СНС при работе по сигналам от GPS, ГЛОНАСС при минимальном уровне мощности захвата

Дополнительно в ходе проверки на технологической ЭВМ программным обеспечением «QGroundControl» фиксировалось состояние признака коррекции по СНС в виде графика. На графике отображалось текущее значение «слова состояния», включающего в себя текущее значение признака коррекции по СНС. Наблюдалось отсутствие признака коррекции по СНС в течении 3 с непосредственно после начала воздействия преднамеренных ошибок по псевдодальностям, что является допустимым. Затем признак коррекции по СНС присутствовал до окончания проверки.

Выполнили включение ПНМ и отправили в ПНМ команду выставки по координатам и курсу. После перехода ПНМ в режим «Работа» подали команду выключения коррекции по нулевым скоростям. На технологической ЭВМ в течение 60 с наблюдали уход значений координат и углов ориентации от параметров выставки. Наблюдалось расхождение текущих значений координат и углов ориентации с параметрами команды выставки.

Отправили в ПНМ команду включения коррекции по нулевым скоростям. На технологической ЭВМ наблюдали стабилизацию значений координат и углов ориентации вблизи средних значений.

Дополнительно в ходе проверки на технологической ЭВМ программным обеспечением «QGroundControl» фиксировались значения углов азимута, крена и тангажа. наблюдался уход текущих значений углов азимута, крена и тангажа. Далее после команды коррекции по неподвижному основанию значения углов азимута, крена и тангажа стабилизировались вблизи средних значений.

Проводили проверку углов курса, крена и тангажа. Включили ПНМ и установили на столе. С помощью технологической ЭВМ отправили в ПНМ команду ввода юстировочных углов блока чувствительных элементов относительно строительных осей носителя с нулевыми юстировками углов курса, крена и тангажа. Поворачивали ПНМ в плоскости стола до достижения показаний углов в технологической ЭВМ близких к значениям, указанным в таблице 1.

Таблица 1

№ п/п	Угол курса	Угол крена	Угол тангажа
1	30°	0°	0°
2	0°	-20°	0°
3	0°	0°	19°

Таким образом в ходе проведения стендовых испытаний установлено, что изделие ПНМ соответствует запланированным параметрам, а также подтверждает допустимость применения разработанных методик контроля параметров ПНМ.

УДК 621.3.049

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА БАЗЕ ФОТОПРИЕМНИКОВ С СОБСТВЕННОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ

Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Тьяловский К.Л., Шадурская Л.И., Самарина А.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Методы неразрушающего, в частности, дистанционного контроля широко используют различные оптические методики измерений. В свою очередь их применение [1] обеспечивает контроль самых разнородных параметров качества изделий и материалов – от химического состава до качества механической обработки поверхности, для контроля технологических процессов. В каждом конкретном случае реализации избранной методики, характеризующейся определённым сочетанием свойств объекта контроля и среды передачи оптического излучения, требуется индивидуальная совокупность применяемых параметров источника и приемника излучения. Это определяет необходимость использования широкой номенклатуры измерительных преобразователей систем оптической диагностики. В ряде случаев для обработки одного информационного оптического сигнала может использоваться несколько измерительных преобразователей.

Выходом из такой ситуации предлагается использовать сочетание двух подходов к реализации измерений: выполнение многопараметрических измерений в односигнальной реализации [2] и использование в измерительных преобразователях систем оптической диагностики полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) с изменяемой функциональностью и переключением поддиапазонов преобразования [3–5] энергетической и спектральной характеристик чувствительности под действием внешних управляющих факторов и параметров самого измерительного сигнала.

Основу ряда многофункциональных ФЭП, предназначенных для применения в измерительных преобразователях, составляют базовые фоторезистивные и барьерные структуры металл-полупроводник (рисунок 1) на основе полупроводников с собственной фотопроводимостью [4, 5].

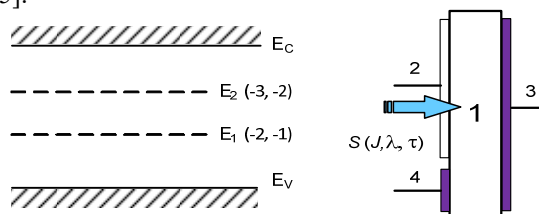


Рисунок 1 – Зонная диаграмма полупроводника с многозарядными примесными центрами (в скобках указаны зарядовые состояния) и приборная структура ФЭП на его основе

Приборная структура на рисунке 1, где 1 – это полупроводник с многозарядными примесными центрами, 2 – прозрачный электрод, 3 – электрод, 4 – управляющий электрод, является базовой, и, в зависимости от требований к характеристикам и функциональности ФЭП, может быть модифицирована. Используя различные комбинации приборных структур, свойство границ раздела металл-полупроводник, материалов полупроводника с низкой концентрацией глубокой примеси и контактов, технологии формирования приборных структур можно получить и ФЭП с существенно различающимися характеристиками [4, 5], и, благодаря использованию сложности процессов рекомбинации и перезарядки примесных центров [5, 6], многофункциональными свойствами (рисунок 2).

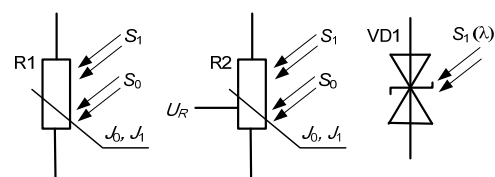


Рисунок 2 – ФЭП на основе полупроводников с собственной фотопроводимостью:
 S_1 – информационный сигнал, S_0 – управляющее воздействие

При этом, фотоприёмные структуры на основе полупроводников с низкой концентрацией глубокой многозарядной примеси [3–5] могут обладать следующим набором свойств, в ряде случаев, позволяющих оперативно изменять их под действием дополнительного электрического или оптического сигнала:

- энергетическая характеристика с расширенным (не менее, чем в два раза) динамическим диапазоном с авто- или внешним переключением между поддиапазонами (многозарядная примесь с акцепторными свойствами);
- непрерывная протяженная энергетическая характеристика (многозарядная примесь с акцепторными свойствами);
- энергетическая характеристика с внутренним усилением;
- спектральная характеристика чувствительности с автоматическим или внешним переключением «красной границы»;
- определение интенсивности оптического излучения и длины волны монохроматического

излучения в одном объеме одноэлементного ФЭП при изменении режима смещения;

– формирование двуполярного электрического сигнала на выходе ФЭП при модуляции оптического сигнала по длине волны (реализация биполярной модуляции в оптических каналах связи);

– 2D и 3D чувствительность к форме и положению светового пятна относительно электродов и краев ФЭП;

– чувствительность к внешним факторам иной физической природы (давление, влажность).

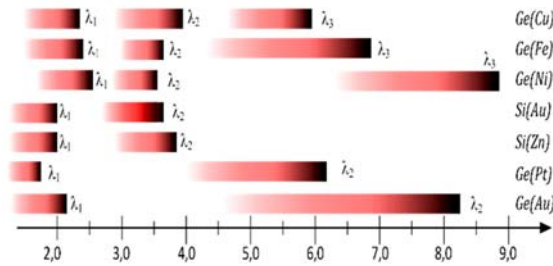


Рисунок 3 – Изменение «красной» границы чувствительности ФЭП под действием управляющих воздействий для разных материалов

Отметим, что использование традиционных фотоприемников для оперативного управления видом спектральной характеристики измерительного преобразователя потребовалось бы использование в нескольких фотоприемниках, каждый с оптическим фильтрующим элементом, настроенным на различные области спектра, светоделительное устройство и схема объединения электрических сигналов. Однако ФЭП на основе полупроводников с собственной фотопроводимостью обеспечивают управление спектральной характеристикой чувствительности в широком диапазоне длин волн (рисунок 3) с использованием только одного элемента.

Для управления характеристиками многофункционального ФЭП в ряде случаев используется оптическое излучение. Применение сапфировых подложек [7] для изготовления управляемых ФЭП позволяет «примирить» различие свойств множества материалов (Si, SiGe, GaN, AlGaIn, тройных и четверных соединений типа A^3B^5 , и других), применяемых при изготовлении ФЭП на основе полупроводников с собственной фотопроводимостью, и формировать интегрированную структуру управляемого встроением излучателем многофункционального ФЭП.

Использование концепции односигнальных измерений в многопараметрическом контроле [2] с применением управляемых многофункциональных ФЭП [4] наиболее эффективно реализуется в измерительных преобразователях, построенных на базе микроконтроллеров [8]. Это позволяет реализовать любой из требуемых алгоритмов процесса многопараметрических

измерений при существенном сокращении числа и типов фотоприемников.

Многофункциональные одноэлементные фотоэлектрические преобразователи на основе полупроводников с собственной проводимостью позволяют реализовать в одном измерительном преобразователе с одноканальной схемой измерения определение нескольких параметров оптического излучения, например, длины волны и мощности оптического излучения, геометрических параметров изображения, сравнение характеристик изображения по нескольким параметрам одновременно. Выбор структуры ФЭП, материала полупроводника, типа глубокой примеси и ее концентрации позволяют создавать фотоприемники для заданного диапазона плотностей мощности излучения, спектрального диапазона и функциональности.

Литература

1. Контроль неразрушающий. Методы оптические. Термины и определения. / Национальный стандарт Российской Федерации. – ГОСТ Р 53696 – 2009.
2. Гусев, О.К. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными состояниями. / О.К. Гусев, Р.И. Воробей, А.Л. Жарин, А.И. Свистун, А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский; под общ. ред. О.К. Гусева – Минск: БНТУ, 2010. – 582 с.
3. Гусев, О.К. Проектирование и управление метрологическими характеристиками фотоэлектрических преобразователей на основе полупроводников с многозарядными примесями / О.К. Гусев, А.И. Свистун, Л.И. Шадурская, Н.В. Яржембицкая // Датчики и системы. – 2011, №1. – С. 19–23.
4. Гусев О. К., Тявловский К. Л., Воробей Р. И., Свистун А. И., Шадурская Л. И. Фотоприемники на основе собственных полупроводников для построения измерительных преобразователей. // Метрология и приборостроение. – 2017, № 2. – С. 34–42.
5. Vorobey, R.I. Photoelectric semiconductor converters with a large dynamic range / R.I. Vorobey, O.K. Gusev, A.K. Tyavlovsky, K.L. Tyavlovsky, A.I. Svistun, L.I. Shadurskaya, N.V. Yarzhebetskaya, K. Kierczynski // Przegląd elektrotechniczny, – Nr 5. 2014, – P. 5–78.
6. Яшин, А. Н. Применимость упрощенной модели Шокли-Рида-Холла для полупроводников с различными типами дефектов / Электронные и оптические свойства полупроводников / А. Н. Яшин // Физика и техника полупроводников. – 2005. Т. 39, № 11. – с. 1331–1333.
7. Andreou, A.G. Silicon on sapphire CMOS for optoelectronic microsystems / A.G. Andreou, Z.K. Kalayjian, A. Apsel, P.O. Pouliquen, R.A. Athale, G. Simonis, R. Reedy // Circuits and Systems. – 2001. – V.1. – P.22–30.
8. Р.И. Воробей, О.К. Гусев, А.И. Свистун, А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский. Измерительные преобразователи систем оптической диагностики с многофункциональными одноэлементными фотоприемниками. // Приборы и методы измерений. – 2018, Т. 9, № 3. – С. 215–226.

УДК 004.056

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ИНФОРМАЦИИ В ОБЛАЧНЫХ СТРУКТУРАХ КОММЕРЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Завадская Т.Е.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Москва, Российская Федерация

Цель – провести исследование возможности применения аппаратного и программного метода на практике для обеспечения целостности информации при использовании облачных технологий. На основе построенной математической модели обеспечения целостности информации в облачных структурах коммерческого применения, разработать алгоритм решения задачи обеспечения целостности информации в соответствии с математической моделью.

Модель ориентирована на обеспечение целостности данных. Базовые правила Модели обеспечения целостности формулируются следующим образом:

1. Простое правило чтения

Субъект с уровнем целостности x_s может читать информацию из объекта с уровнем целостности x_o тогда и только тогда, когда x_o преобладает над x_s .

2. Простое правило записи

Субъект с уровнем целостности x_s может писать информацию в объект с уровнем целостности x_o тогда и только тогда, когда x_s преобладает над x_o . Для первого правила существует мнемоническое обозначение No Read Down, а для второго – No Write Up.

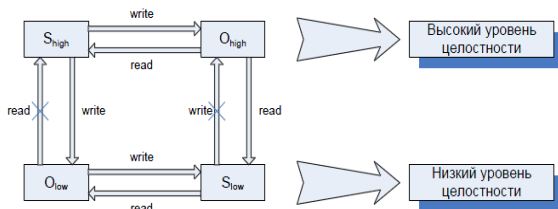


Рисунок 1 – Диаграмма информационных потоков для модели целостности

Отдельного комментария заслуживает вопрос, что именно понимается в модели под уровнями целостности. Действительно, в большинстве приложений целостность данных рассматривается как некое свойство, которое либо сохраняется, либо не сохраняется – и введение иерархических уровней целостности может представляться излишним. В действительности уровни целостности в модели необходимо рассматривать как уровни достоверности, а соответствующие информационные потоки – как передачу информации из более достоверной совокупности данных в менее достоверную и наоборот. Формальное описание модели полностью аналогично описанию модели Белла-ЛаПадулы. К достоинствам модели целостности

следует отнести её простоту, а также использование хорошо изученного математического аппарата. В то же время модель сохраняет все недостатки, присущие модели Белла-ЛаПадулы (потенциальная возможность организации скрытых каналов передачи информации и т. д.).

Математическая постановка задачи

Исходные данные:

– $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ – множество возможных актуальных классов угроз нарушения целостности информации в системе, N – число атак, определяемых классом угроз;

– $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$ – множество средств защиты от возможных угроз, $M = \{1, 2, \dots, m\}$ – множество индексов средств защиты;

– $T = [t_0, t_{max}]$ – рассматриваемый период функционирования. $k_i, \forall i \in N, k_i \geq 0$ – среднее число реализации i -й угрозы на интервале T , определяются по данным статистики или с помощью экспертов;

– $u_i, \forall i \in N$ – средний ущерб от реализации i -й угрозы (атаки);

– $c_j, j \in M$ – стоимость j -го средства защиты;

– $p_{ij}, \forall i \in N, j \in M, [0, 1]$ – вероятность (или нечеткая мера – возможность) предотвращения i -й атаки на целостность с помощью j -го средства защиты, определяется по данным статистики или с помощью экспертов.

Показатель качества выбора средств защиты. Введем булеву переменную $x_j \in \{0, 1\}, \forall j \in M$, $x_j = 1$, если j -е средство защиты будет применяться в системе для защиты от тех или иных угроз нарушения целостности информации; $x_j = 0$, в противном случае, т. е., если j -е средство не применяется.

Тогда X – вектор булевых переменных $\forall j \in M$. Введем показатель качества выбора средств защиты:

$$U(X) = \sum_{i \in N} u_i k_i \{p_{ij} x_j\}, j \in M \quad (1)$$

Ограничение.

$$\sum_{j \in M} c_j x_j \leq C, \quad (2)$$

где C – максимально возможные затраты, выделенные на защиту информации в АС.

Этим условием ограничивается стоимость выбранных средств защиты.

Постановка задачи

$$U(X) = \sum_{i \in N} u_i k_i \{p_{ij} x_j\} \rightarrow \max, j \in M, X \in \Delta_{\text{доп}}, \quad (3)$$

$$\Delta_{\text{доп}}: \sum_{j \in M} c_j x_j \leq C,$$

здесь $\Delta_{\text{доп}}$ – множество допустимых альтернатив реализации средств защиты.

Из введенного показателя качества выбора средств защиты, который должен стремиться к максимуму и с учётом множества допустимых альтернатив реализации средств защиты, решением математической постановки задачи будет являться нахождение всех неизвестных компонент вектора X и выбор тех средств защиты b_j , для которых компонента вектора x_j равна 1.

В соответствии с разработанной математической моделью, необходимо разработать алгоритм, направленный на решение задачи обеспечения целостности информации в облачных структурах коммерческого применения.

Для того чтобы определить, какие средства защиты необходимы для максимальной степени защиты системы, необходимо рассмотреть классы атак.

В контексте облачных хранилищ можно разделить класс атаки на целостность на две:

- атака на облачное хранилище с целью нарушение целостности в облаке вне синхронизации, например, подмена файла;

- атака на облачное хранилище при синхронизации файлов, используя уязвимости мобильного устройства, канал связи или облачного хранилища.

Таким образом, разрабатываемое решение будет состоять из модуля проверки целостности файла, взаимодействующего с основным модулем облачного сервиса, обеспечивающего верси-

онность файлов, авторизацию пользователей и так далее. Проверка целостности от динамических атак актуальна при записи файла из источника, при чтении файла актуальна проверка целостности от статических атак. Результаты проверки целостности файлов будут выводиться на консоль либо в графический интерфейс.

Согласно модели обеспечения целостности информации, источник с высоким уровнем целостности может писать в файлы как с высоким уровнем целостности, так и с низким. Если пришёл запрос от источника с низким уровнем целостности, программа должна ограничить источник, чтобы он имел возможность записывать в файлы с низким уровнем целостности. После записи в файл производится проверка целостности информации.

Литература

1. Завгородний В.И. Комплексная защита информации в компьютерных системах. М.: Логос, 2001. – 256 с.
2. Клементьев И.П., Устинов В.А. Введение в облачные вычисления // Интернет университет информационных технологий. – Режим доступа: <http://www.intuit.ru/department/se/incloudc/>. – Дата доступа 22.10.2016.
3. Li J., Wang Q., Wang C., Cao N., Ren K., Lou W. Fuzzy keyword search over encrypted data in cloud computing. Mini-Conf. IEEE INFOCOM, 2010, Digital Object Identifier 10.1109/INFOCOM.2010.5462196
4. Android vulnerabilities. – Режим доступа: <https://www.androidvulnerabilities.com/>. – Дата доступа: 15.09.2020.

УДК 681.326

ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОМУ ДОСТУПУ В ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ANDROID

Карташова Ж.К.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Москва, Российская Федерация*

ОС Android за небольшой промежуток времени стала одной из самых популярных систем для всевозможных мобильных устройств. Ее используют как крупные производители с мировым именем, так и небольшие компании. Данная публикация посвящена анализу существующих решений в области защиты мобильных устройств, анализу алгоритмов управления доступом. Описаны программные и аппаратные требования для функционирования мобильной программы в операционной системе Android

На современном этапе развития все более активно в повседневную деятельность внедряются различные мобильные устройства. Уже несколько лет рынок мобильных устройств занимает лидирующие позиции по количеству пользователей, превосходя рынок персональных компьюте-

ров. Учитывая возможности современных мобильных устройств перед разработчиками встают новые вопросы и проблемы в области обеспечения информационной безопасности. Для достижения этих целей мобильные устройства необходимо защищать от самых разных угроз.

Популярность использования мобильных устройств требует больших ресурсов для управления настройками и обеспечения информационной безопасности.

Разработанные для управления инфраструктурой мобильных устройств Mobile Device Management системы задают настройки соответствия политикам безопасности и настройки доступа в корпоративную сеть для всех одобренных мобильных устройств. При этом с их помощью осуществляется регистрация и мониторинг

устройств, а в случае потери или кражи смартфона или планшета с помощью MDM с него можно удалить конфиденциальные либо все данные.

Основные угрозы и уязвимости информационной безопасности мобильных устройств под управлением ОС Android. *Использование недоверенных мобильных устройств.* Сегодня в мобильных устройствах не реализованы технологии «корня доверия» (root of trust), например, модули Trusted Platform Module, (TPM), которые все чаще встраиваются в ноутбуках и рабочих станциях. К тому же нередко встречаются такие действия, как «rooting» мобильных устройств, свидетельствующие о том, что встроенные ограничения по безопасности, используемые операционной системой можно обойти.

Использование недоверенных сетей. Поскольку мобильные устройства используют для доступа в интернет внешние каналы связи, пользователь обычно не может контролировать безопасность используемых устройств сетей. В их число могут входить широкополосные сети, в том числе кабельные и беспроводные, например, Wi-Fi или сотовые сети. Эти системы связи не защищены от перехвата данных, что создает риск кражи конфиденциальной информации с целью перехвата и модифицирования сообщений.

Риски, возникающие при использовании недоверенных сетей, можно уменьшить, применяя технологии шифрования (например, виртуальные частные сети, VPN) для защиты конфиденциальности и целостности сообщений, а также с помощью механизмов взаимной аутентификации для проверки подлинности обеих сторон, участвующих в передаче данных.

Использование недоверенных приложений. Мобильные устройства позволяют легко находить, приобретать, устанавливать и использовать приложения сторонних разработчиков из магазинов мобильных приложений. Это создает очевидные риски, особенно для платформ и магазинов приложений, не накладывающих на приложения ограничений, обусловленных требованиями безопасности, или иных условий.

Риск, связанный с этими приложениями, можно уменьшить несколькими способами. Можно запретить установку посторонних приложений, создать «белый список» для допуска к установке только доверенных приложений, проверять, что приложение имеет только необходимый доступ к ресурсам мобильного устройства, или реализовать безопасную программную среду, которая изолирует конфиденциальные данные от прочих данных и приложений на мобильном устройстве.

Взаимодействие с другими системами. Мобильные устройства могут взаимодействовать с другими системами в рамках обмена данными и хранения данных. Взаимодействие с локальной

системой чаще всего подразумевает соединение мобильного устройства со стационарным компьютером или ноутбуком по беспроводному каналу или через кабель для зарядки и/или синхронизации. В момент синхронизации устройств злоумышленник может перехватить конфиденциальную информацию.

Троянские программы. В зависимости от семейства, эти вредоносные программы обладают таким функционалом, как, сбор конфиденциальной информации пользователя, добавление закладок в браузер, выполнение команд, поступающих от злоумышленников, отправка СМС-сообщений, установка других приложений и многое другое. Чтобы реализовать возможность установки приложений, не вызывая подозрений со стороны пользователя, троянцам необходимы права root, которые в ОС Android можно получить, установив стороннюю прошивку на мобильное устройство.

Программные и аппаратные требования при разработке мобильной программы в ОС Android. Основную информацию о программе в системе предоставляет файл манифеста *AndroidManifest.xml*. Каждое приложение должно иметь свой файл *AndroidManifest.xml*.

Назначение файла:

- объявляет имя Java-пакета приложения, который служит уникальным идентификатором;
- описывает компоненты приложения – деятельности, службы, приемники широковещательных намерений и контент-провайдеры, что позволяет вызывать классы, которые реализуют каждый из компонентов, и объявляет их намерения;
- содержит список необходимых разрешений для обращения к защищенным частям API и взаимодействия с другими приложениями;
- объявляет разрешения, которые сторонние приложения обязаны иметь для взаимодействия с компонентами данного приложения;
- объявляет минимальный уровень API Android, необходимый для работы приложения;
- перечисляет связанные библиотеки.

Версия операционной системы. Устройства могут поддерживать разные версии ОС Android, такие как Android 4.0 или Android 5.0. Каждая последующая версия системы часто дополняется новыми функциями API, которые недоступны в предыдущих версиях системы. Для определения набора доступных функций API каждой версии ОС соответствует уровень API. Например, Android 1.0 – это 1-й уровень API, а Android 5.0 – этой 20-й уровень.

Каждая последующая версия ОС Android обеспечивает совместимость для приложений, которые были составлены с помощью функций API предыдущих версий, то есть мобильное приложение всегда будет совместимо с будущими версиями ОС Android.

Выводы. В результате были проанализированы существующие угрозы и уязвимости в ОС Android, проведен обзор версий операционной системы и рассмотрены аппаратные и программные требования для функционирования мобильной программы в ОС Android.

На основании анализа выявлено, что основными угрозами противодействия несанкционированного доступа являются использование недоверенных приложений, что может привести к несанкционированному доступу в устройство, троянские программы, эта угроза является следствием недоверенных программ.

Литература

1. Михайлов С.Ф., Петров В.А Информационная безопасность. Защита информации в автоматизированных системах. Основные концепции: Учебное пособие М.: МИФИ, 2015. 192 с..
2. Мельникова О.В. Смартфоны на Android Москва, 2013. – 304 с.
3. Список уязвимостей ОС Android. Система известных уязвимостей: MITRE corp.
4. Android vulnerabilities. – Режим доступа: <https://www.androidvulnerabilities.com/>. – Дата доступа: 27.09.2020.

УДК 376.356: 004.9

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПОДГОТОВКЕ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ

Боженков В.В.¹, Шахлевич Г.М.²

¹Белорусская государственная академия связи
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

В условиях лавинообразного роста объема и обновления информации все актуальней становится необходимость повышения качества, эффективности и доступности знаний. Проблема соответствия системы образования вызовам современности решается только за счет коренной модернизации основных звеньев образовательного процесса: преподаватель – учебно-методическое, техническое и организационное обеспечение – учреждение образования. Носителем самого ценного в образовательном процессе (живая беседа, дискуссия, совместный анализ и исследовательская деятельность) является преподаватель. Общение с аудиторией в рамках традиционного занятия сегодня непопулярная роскошь. Условием эффективного использования уникальных возможностей преподавателя и инструментом интенсификации образовательной деятельности являются интерактивные электронные образовательные ресурсы (ЭОР) [1]. Однако их неквалифицированное применение в подготовке инженерных кадров сопряжено с определенными опасностями: меньше времени уделяется изучению применяемых технических творчестве математических методов, физическому смыслу моделируемых явлений и другим теоретическим аспектам специальных дисциплин [2]. Как следствие, отсутствие хорошей теоретической подготовки вызывает непонимание студентами результатов моделирования технических устройств и физических явлений на компьютерах с использованием программ симуляторов.

Например, широкое использование презентаций для предоставления теоретического материала имеет ряд недостатков. Как отмечается в работе [3] это прежде всего информационная пере-

грузка студентов. Каждый преподаватель имеет естественное желание предоставить максимальный объем знаний по читаемой дисциплине. Обладая значительными возможностями в текстовом и графическом предоставлении материала он часто готовит сложные информационно-перегруженные слайды. Следствием этого является высокая скорость изложения материала и невозможность его записи и усвоения студентами. Теряется эмоциональная привлекательность занятий. Как при перегрузке, так и в случае простоты материала и малозагруженности презентации студенты демонстрируют отказ от записи и осмысления учебного материала. Нередко это приводит к нарушению дисциплины и пропускам лекционных и других видов занятий. Возможность рассылки или копирования презентаций успокаивает студентов в благом намерении посмотреть учебный материал в «домашней обстановке». Методисты рекомендуют подавать «дозированные порции информации». Но как определить размер этой дозы в условиях разной подготовки и способностей студентов?

Следующий недостаток использования презентаций информационно-ограничительный. Задача высшей школы научить студента ориентироваться в пространстве знаний самостоятельно остается невыполненной. Студенты даже на младших курсах уже достаточно загружены, поэтому не могут или не хотят читать учебники, монографии и другие материалы, ограничивая себя объемом презентаций представленных в их распоряжение.

Конечно, эти недостатки не мешают грамотно применять презентации на лекциях и семинарах

у гуманитариев. Однако они мало способствуют приобретению и развитию профессиональных навыков и умений по инженерным дисциплинам.

Всеохватывающая компьютеризация влечет за собой издержки – компьютерную эйфорию или, по выражению выдающегося ученого и инженера академика И.И. Артоболевского «компьютерное шапкозакидательство».

Первым и самым показательным объектом компьютеризации в инженерном образовании стала компьютерная графика. Чертежные залы с кульманами заменили на компактные плоттеры, ксероксы, принтеры. Однако по пришествию определенного времени во многих университетах были восстановлены чертежные залы с кульманами. Причиной столь основательного отката явилось недостаточная подготовка по инженерной графике – международному языку технических работников. Дидактические и технологические приемы накопленные этой наукой и учебной дисциплиной обеспечивали обучаемому достаточно высокий уровень инженерного мастерства.

Основой получения качественных профессиональных навыков по инженерной графике являлись два базовых принципа:

– «руки растят голову» – все упражнения выполнялись на бумаге с помощью карандаша, линейки и циркуля путем многократных повторений с помощью ластика;

– преподаватель с высоким уровнем мастерства даже после 20-й переделки мог найти в чертеже ошибки.

Поэтому именно в тесной связке преподаватель – студент формировался высокий уровень инженерных знаний и навыков. Основной минус прихода компьютерной графики заключался в том, что из процесса обучения исчез преподаватель – главный носитель мастерства, редактор и корректор [4].

Такая ситуация не только с инженерной графикой, но и с многими другими дисциплинами инженерного профиля. Это привело к тому, что резко вырос образовательный разрыв между уровнем подготовки молодого специалиста и уровнем современных инженерных технологий.

При всех преимуществах применения в образовательном процессе информационных технологий необходимо помнить, что даже наилучший электронный образовательный ресурс по всем сравнимым составляющим уступает преподавателю. В первую очередь это относится к возможностям организации взаимодействия и способности к творческому мышлению. Только преподаватель найдет понятный ответ на неудачно сформулированный вопрос, предложит оригинальное решение задачи, организует коллективный анализ проблемы и дискуссию. Именно на это и должен тратиться самый ценный ресурс системы образо-

вания – общение обучающегося с преподавателем. ЭОР призваны обеспечить трансформацию традиционных технологий, основанных на репродуктивной модели обучения в направлении инновационных технологий учения, когда достаточно самостоятельный ученик, формирующий свои компетенции под руководством наставника.

Отдельный вопрос лабораторные работы по техническим дисциплинам. Как с помощью виртуальных моделей, являющихся составной частью мультимедийных ЭОР, заменить такой дорогостоящий компонент инженерного образования как лабораторные практикумы? Можно ли научить специалиста правильной разделке электрического кабеля или сварке оптоволокна с помощью компьютера?

По-видимому, нет. Натурная лаборатория, учебная мастерская – ценности непреходящие, и в условиях применения в образовании информационных технологий значимость реальных экспериментов и результативного труда только повышается. А при подготовке инженерных кадров именно лабораторные практикумы дают навыки исследовательской деятельности и позволяют формировать большинство умений и профессиональных компетенций. При внедрении информационных технологий и систем автоматизации в лабораторные практикумы необходимо учитывать, что реализация имитационных моделей на ЭВМ и работа в условиях полной автоматизации измерений не дает практических навыков и представления о принципах действия и конструкции реальных устройств [5].

Расходящиеся траектории инженерного образования и инновационной практики инженерного дела привели к образовательному разрыву уже в конце прошлого века. Однако эта тема не заострялась менеджерами образования по причине активного внедрения компьютеров в процесс освоения программ подготовки инженеров. Появилась надежда, что компьютеризация позволит исправить все недостатки инженерного образования. Сегодня уже очевидно, что компьютеризация лишь увеличила разрыв между потребностями практики и результатами образовательного процесса.

На эту проблему обратили внимание работники всего мира. Для подготовки нового поколения инженеров, способного самостоятельно решать производственные задачи, необходимо кардинальное реформирование инженерного образования. Вспомнить и восстановить все лучшее, что было в инженерной подготовке специалиста в недавнем прошлом. Начинающий инженер должен владеть минимальным пакетом знаний и навыков на уровне мастерства. Это совершенно новый подход для технических университетов, поскольку большинство из них считают главным общую теоретическую подготовку

инженера, а практический опыт и мастерство отдают на откуп первому месту работы молодого специалиста, считая это заботой работодателя. Сегодня эта новая парадигма внедряется в инженерное образования во всем мире.

Литература

1. Электронные образовательные ресурсы. Аналитическая записка. – М.: Институт ЮНЕСКО по информационным технологиям в образовании, 2012. – 32 с.
2. Москаленко О. В. Использование презентаций в преподавании учебных дисциплин в высшей школе /

В.О. Москаленко // Образовательные технологии – 2015. – № 2. – С. 112–118.

3. Основы САПР. Лекция 1. Автоматизированное проектирование промышленных изделий. Режим доступа: www.Intuit.ru.

4. Лившиц В. Парадоксы компьютеризации в инженерном образовании. Инженерная графика / В. Лившиц // САПР и графика. – 2012. – № 1.

5. Боженков В.В. Лабораторный практикум в структуре интерактивных образовательных ресурсов по инженерным дисциплинам // Сб. материалов МНТК. Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. (ITRT-2014). Тольятти, 2014. – С. 45–50.

УДК 621

КОНТРОЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ ПОЖАРЕ В ЖИЛОМ ПОМЕЩЕНИИ

Антошин А.А., Волков С.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Пожарные извещатели применяемые в зданиях, где могут находиться люди, должны обеспечить условия для безопасной эвакуации людей в случае пожара. Для этого пожар необходимо обнаружить до момента возникновения опасности для людей на местах их нахождения. Решение этой задачи требует изучения связи между значениями опасных факторов пожара и параметрами окружающей среды, которые должны измеряться пожарными извещателями. Опасность, возникающая для людей во время пожара в помещении, может быть вызвана, повышенной температурой окружающей среды, потерей видимости, воздействием на людей токсичных продуктов горения [1–7]. Не всегда параметры, характеризующие эти воздействия, контролируются пожарными извещателями. Например, точечный оптико-электронный дымовой пожарный извещатель, наиболее часто применяемый в жилых помещениях, контролирует величину потока оптического излучения, рассеянного дымом, а оптико-электронный линейный дымовой извещатель оптическую плотность газобразной среды, содержащей дым.

Характер изменения названных и других величин, описывающих свойства окружающей среды во время пожара, исследовался в ряде работ [1, 7, 8]. В работе [7] авторы исследовали динамику изменения температуры, концентрации угарного газа и дыма на разном расстоянии от оси пожара. В работе [8] исследования проводились в помещениях макета квартиры размером 20,1×4,2 м, состоящей из спальни, жилой комнаты и двух холлов. Высота потолка составляла примерно 2,4 м. В качестве топлива использовались пластины пенополиуретана размером 10×10×8 см. Исследовалось изменение концентрации угарного газа, углекислого газа и температуры под по-

толком помещений при тлении. Опасность, возникающая для людей во время пожара в помещении, рассматривается в ISO 13571.

Согласно статистическим данным МЧС Республики Беларусь, а также исследованиям ряда авторов [1–5] одной из основных причин гибели людей при пожарах (более 90 %) является отравление газообразными продуктами горения. Результаты патологоанатомических исследований, представленные в работах [3, 5] показали, что в большинстве случаев гибель людей на пожаре вызвана воздействием угарного газа и синильной кислоты.

Однако остается недостаточно изученным пространственное распределение опасных факторов пожара и характеристик окружающей среды при пожаре в типовой жилой комнате.

В настоящей работе исследовалась динамика изменения во времени и пространственное распределение продуктов горения при пожаре в жилом помещении.

В качестве очагов пожара для жилой (спальной) комнаты использовался макет мягкой мебели, моделирующий как пламенное горение, так и тление. Макет мягкой мебели представлял собой две пластины пенополиуретана плотностью 28 кг/м³ размером 50×50×10 см в чехлах из хлопчатобумажной ткани (для имитации тлеющего пожара) или синтетической ткани (для имитации пламенного пожара), расположенные под углом 90° друг к другу, образуя конструкцию Г-образной формы. Макет размещался на высоте 0,4–0,5 м от пола.

На рисунках 1 и 2 представлены зависимости потока оптического излучения, рассеянного дымом, от времени горения тлеющего и пламенного пожара в разных местах жилого помещения.

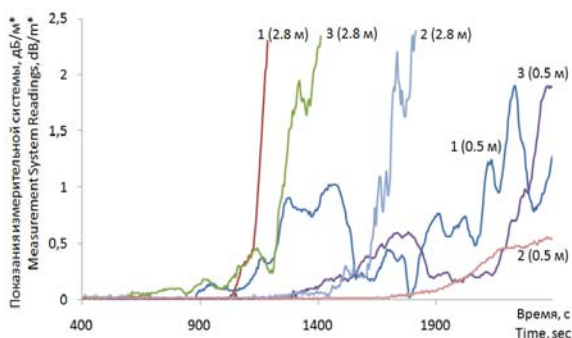


Рисунок 1 – Зависимость потока оптического излучения, рассеянного дымом, от времени горения тлеющего пожар у окна (1), двери (2) и в центре комнаты (3) на высоте 2,8 и 0,5 м от пола

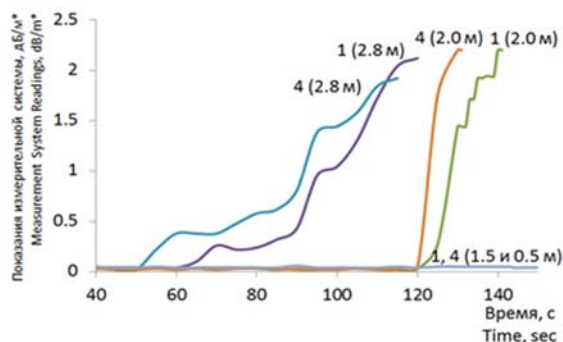


Рисунок 2 – Зависимость потока оптического излучения, рассеянного дымом, от времени горения пламенного пожар у окна (1) и в глубине комнаты (4) на высоте 2,8 и 0,5 м от пола

Анализ представленных зависимостей показывает, что при тлении раньше всего поток оптического излучения, рассеянный дымом появляется в центре помещения в контрольной точке 3(2.8). Происходит это примерно на 600 секунде тления. В других контрольных точках поток оптического излучения, рассеянный дымом, появился на 1100 секунде у окна и на 1300 секунде у двери в глубине комнаты. Максимальные показания измерительной системы в промежутке времени до 500 с составляли 0,05 дБ/м*, что соответствует оптической плотности ниже 0,05 дБ/м, а это не соответствует нормативным значениям порога срабатывания дымовых оптических извещателей в соответствии с СТБ 11.16.03.

Установлено, что в условиях тлеющего пожара, характер распределения концентрации угарного газа в помещении зависит от величины тепловыделения очага пожара. На начальном этапе пожара, до формирования четко выраженной тепловой колонки угарный газ в помещении распределен равномерно во всем объеме и достигает значения 20 ppm. После формирования тепловой колонки концентрация угарного газа выше 1,5 м от пола превышает его концентрацию в нижней части помещения.

Показано, что при пламенном пожаре с уменьшением расстояния от пола до точки контроля значения измеряемых параметров (концентрация угарного газа, оптическая плотность среды и температура) снижались. На высоте 1,5 и 0,5 м за время эксперимента поток оптического излучения, рассеянный дымом практически не изменился, а на высоте 2,0 м его увеличение наблюдалось только после второй минуты пожара.

В работе впервые получено распределение удушающего (угарный газ) и раздражающих газов при пламенном горении макета мягкой мебели в жилом помещении. На высоте ниже 2,0 м зафиксированы только изменения концентрации угарного газа. На высоте 1,5 м концентрация угарного газа на 135 секунде достигала значения 6–7 ppm. Раздражающие газы обнаружены на высоте 1,5 м (HCL) и 0,5 м (HF, NO₂). Концентрация фтористого водорода составила – 0,012 ppm (0,01 мг/м³), а двуокиси азота – 0,05227 ppm (0,01 мг/м³).

Литература

1. Bukowski R.W., Peacock R.D., Averill J.D., Cleary T.G., Bryner N.P., Walton W.D., Reneke P.A., Kuligowski E.D. Performance of Home Smoke Alarms. Analysis of the Response of Several Available Technologies in Residential Fire Settings // NIST Technical Note 1455-1, 2008 – 265 p.
2. Пузач С.В., Смагин А.В., Лебедченко О.С., Доан В.М., Полевода И.И., Полоз Д.А., Осяев В.А., Кузьмицкий В.А. Роль динамики опасных факторов пожара в патогенезе отравления человека на пожаре / С.В. Пузач. – Вестник командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь, №1 (11), 2010 – С. 4–10.
3. Свиричевский С.Ф., Соколик Г.А., Лейнова С.Л., Рубинчик С.Я., Клевченя Д.И., Гулевич А.Л. Определение состава газовой фазы, образующейся при термическом разложении полимерных материалов / С.Ф. Свиричевский. – Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – Т. 79, № 8. – 2013. – С. 12–16.
4. Proulx G., Cavan N., Tonikian R. Egress Times from Single Family Houses. Institute for Research in Construction, National Research Council Canada Research Report: IRC-RR-209, July 2006.
5. Петров Л.В. Судебно-медицинская характеристика комбинированных отравлений в условиях пожара: автореф. дис. канд. мед. наук / Л.В. Петров. – СПб, 1993. – 24 с.
6. Антошин А.А., Волков С.А. Методика исследования параметров среды и продуктов горения в жилом помещении и смежных с ним пространствах / А.А. Антошин. – Приборы и методы измерений. – 2018. – Т. 9, № 4. – С. 347–358. DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-347-358.
7. Davis W.D., Cleary T., Donnelly M., Helleman S., Prediction Smoke and Carbon Monoxide Detector Response in the Ceiling Jet in the Presence of a Smoke Layer, NISTIR 6976, National Institute of Standards and Technology, 2003, 34 p.
8. Cleary T.G. A Test Methodology for Multiple Sensor – Multiple Criteria Alarms. 13th International Conference on Automatic Fire Detection AUBE '04, Germany, University of Duisburg, 2004.

УДК 681.3.067. ББК 32.973

ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Бондарев В.В.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Москва, Российская Федерация*

Рассматриваются вопросы практического психологического взаимодействия и сотрудничества в процессе защиты информации, приемы установления и поддержания психологического контакта, приемы социальной инженерии, теория конфликта, субъекты обеспечения информационной безопасности и их взаимодействие.

Ключевые слова: психология; информационная безопасность; инсайдер; нарушитель; защита информации; социальная инженерия; организационно-психологические меры защиты информации; мотивация.

Введение. Почему пользователи записывают пароль на клочке бумаги и хранят его под клавиатурой или в ящике стола? Почему они не соблюдают правила ИБ? Почему руководство организации иногда очень сложно мотивировать потратить даже скромную сумму на ИБ? Почему с регуляторами/проверяющими/аудиторами сложно найти общий язык? Почему пользователи выбирают нестойкие пароли? Почему мы недооцениваем одни риски/угрозы и преувеличиваем другие?

Дать ответы на все эти вопросы может новое, ещё не до конца сформировавшееся направление в «классической» ИБ, которому и названия ещё нет. Обычно применяют такие термины, как «организационно-психологические аспекты ИБ», «информационно-психологическое направление в безопасности» и прочее.

Кроме того, есть и множество других направлений, в которых может помочь опытные профессионалы-психологи:

- понимание мотивации злоумышленников/нарушителей и поиск методов противодействия им;
- прогнозирование действий внутренних нарушителей;
- доведения до всех заинтересованных сторон (особенно руководства) актуальности ИБ;
- повышение осведомлённости в вопросах ИБ;
- формирование эффективной команды ИБ;
- эффективная работа с конечными пользователями, в частности, понимание действий пользователей.

Нужно отметить, что проблема информационно – психологических аспектов ИБ лежит в среде междисциплинарного взаимодействия: права, психологии, информационных технологий и «классической» ИБ.

Направления деятельности психологов в области ИБ: совершенствование практики под-

бора кадров, обращая особое внимание на выявление потенциальных инсайдеров; противодействие социальной инженерии; взаимодействие службы/администратора информационной безопасности с конечными пользователями; взаимодействие службы/администратора информационной безопасности с руководством организации.

Рассмотрим эти направления более подробно.

Совершенствование практики подбора кадров, обращая особое внимание на выявление потенциальных инсайдеров. Подбор кадров/выявление инсайдеров с учётом аспектов нарушений ИБ имеет свои особенности. Основные усилия необходимо сосредоточить на разработке модели нарушителя.

Конечно, данная модель нарушителя имеет слишком уж описательный характер.

Поэтому для выявления инсайдеров и отсеивания «подозрительных» соискателей можно и необходимо использовать различные инструменты. Например, опросник MBTI, основанного на идеях Карла Густава Юнга.

Социальная инженерия. Самое эффективное, для чего применяется социальная инженерия, – это добыча информации.

Основным способом защиты от методов социальной инженерии является обучение сотрудников. Причём это обучение должно вестись с учётом рекомендаций психологов, учитывающих психотип обучаемого.

Взаимодействие администратора безопасности с конечными пользователями. Сотрудники организации являются самой массовой категорией нарушителей в силу их многочисленности, наличия у них санкционированного доступа на территорию, в помещения и к ресурсам системы, разнообразия мотивов совершения разного рода небезопасных действий. Причём подавляющее большинство нарушений со стороны сотрудников носит неумышленный характер. Однако, ущерб, который они при этом наносят организации, весьма значителен. Именно поэтому борьба с ошибками пользователей и обслуживающего персонала АС является одним из основных направлений работ по обеспечению безопасности.

Взаимодействие администратора безопасности с руководством организации. Какие конкретно формы и методы работы выбрать со своим руководителем, зависит от характера и темперамента этого руководителя. А характер и темперамент определяют его стиль, метод, тип руководства. Данный вопрос детально рассмотрен в работах американских психологов Р. Блэйк

и Д.Моутон, в которых для определения типа менеджера разработана матрица типов руководителей. Подробности широко освещены в литературе и доступны для практического применения.

Кто же будет заниматься всем этим? HR-служба «прогоняет» сотрудника по определённым набору тестов. Информация передаётся в службу обеспечения ИБ. Зная, к какому типу принадлежит сотрудник, специалист в сфере обеспечения ИБ определяет его потенциальную склонность к инсайду (должны учитываться не только ключевые характеристики психотипа, но и другие переменные: выраженность предпочтений, склонность к риску, уровень социального интеллекта). Конечно, это примерный алгоритм. Как его реализовать – зависит от масштаба организации, предметной области, которой он функционирует, критичности ресурсов и ещё множества факторов.

Как использовать полученные результаты, например, результаты тестирования сотрудника? Если ваш работник – обладатель ярко выраженного психологического (соционического) типа, входящего в «группу риска», то за ним лучше всего «приглядывать». Другой пример – администратор безопасности с учётом типа руководителя организует общение с ним по вопросам обеспечения ИБ.

Выводы. Основной целью деятельности психологов совместно HR-службой, сотрудниками службы ИБ, юристами, «автоматизаторами» и т.д. – создание гармоничной среды, способствующей развитию сотрудников и всей организации в целом, что предполагает:

- улучшение психологического климата организации и повышение «боевого духа ее сотрудников», в том числе фокусирование усилий на защиту информации;
- совершенствование практики подбора кадров, обращая особое внимание на выявление потенциальных инсайдеров;
- оказание поддержки сотрудникам в развитии их способностей, в том числе таких, как запоминание паролей;

УДК 628.74

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПОТОКА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ПРОШЕДШЕГО ЧЕРЕЗ ЗАДЫМЛЕННУЮ СРЕДУ ПРИ ПИРОЛИЗЕ И ТЛЕНИИ ХЛОПКА В ПОМЕЩЕНИИ

Антошин А.А.¹, Безлюдов А.А.¹, Кучура Е.А.¹, Галузо В.Е.²

*¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

*²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь*

Применяемые в настоящее время методы обнаружения возгораний не обеспечивают на стадии обнаружения возможности определения потенциальной опасности пожара. Одним из способов решения этой задачи может стать переход от ста-

- сплочение коллектива в единую команду, стремящуюся парировать/нейтрализовать все угрозы безопасности по отношению к организации;
- устранение конфликтов, в первую очередь между пользователями и сотрудниками ИБ, между сотрудниками ИБ и сотрудниками ИТ;
- снижение текучести кадров, связанную с нарушениями режима ИБ;
- создание атмосферы доверия между сотрудниками ИБ и пользователями, добиваться, чтобы эти категории были союзниками, а не противниками по поддержанию режима ИБ;
- проведение разумной политики поощрения и наказания в организации, в том числе создания баланса между административным принуждением и сознательным выполнением регламентов ИБ;
- консультирование руководителей по психологическим аспектам деятельности организации в области ИБ;
- обучение руководителей и сотрудников психологическим технологиям взаимодействия и методам психологической защиты.

Литература

1. Бондарев В.В. Функционально-системный подход в подготовке специалиста в области информационной безопасности // Сборник трудов конференции. НУК ИУ МГТУ имени Н.Э. Баумана. М.: 2017.
2. Бондарев В.В. Учебное пособие. Введение в информационную безопасность автоматизированных систем // Москва. Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана. 2016 – 236 с.
3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27002 2012 «Информационные технологии. Методы и средства обеспечения безопасности. Свод норм и правил менеджмента информационной безопасности» (утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 сентября 2012 года №423-ст). Дата введения: 01.01.2014.
4. «О профессиональном психологическом отборе кандидатов на службу в органы прокуратуры Российской Федерации и обучение в государственные образовательные организации». Приказ Генеральной прокуратуры РФ от 15 сентября 2014 года № 493.

тических измерений к динамическому контролю факторов пожара.

В работе исследовалась динамика пропускающей способности газовой среды в помещении при тлении и разной температуре (500 °С,

600 °С и 700 °С) пиролизе хлопчатобумажных фитилей. Экспериментальное исследование проводилось на установке «Дымовой канал» [1]. В качестве горючего в каждом эксперименте использовались семь хлопчатобумажных фитилей длиной по 10 см, масса фитилей составляла $3,0 \pm 0,1$ г. В экспериментах с пиролизом фитили укладывались на металлическую пластину, которая в свою очередь располагалась на электрической нагревательной плите. Мощность плиты регулировалась лабораторным автотрансформатором. В экспериментах с тлением фитили подвешивались на штативе внизу помещения испытательной камеры. Тление фитилей инициировалось поджогом их обоих концов, после чего пламя задувалось. Временные зависимости выходного сигнала оптико-электронного измерительного преобразователя $\Phi(t)$, контролирующего поток прошедшего сквозь задымленную среду излучения, анализировались методом Евклидовых расстояний [2]. Для этого рассчитывались величины отрезков, соединяющие соседние результаты измерений (экспериментальные точки) в двумерном пространстве поток излучения-время. Поскольку временной интервал между измерениями величин потока прошедшего излучения был постоянный и равен одной секунде, вычисленные из этих результатов Евклидовы расстояния отражают изменения величины прошедшего через задымленную среду потока оптического излучения за одну секунду. Гистограмма, показывающая изменение процента Евклидовых расстояний определенного размера от общего их числа на анализируемой экспериментальной зависимости, представляет собой характеристическую кривую анализируемого процесса. В работе получены характеристические кривые процессов накопления дыма в помещении в результате тления и разной температуры пиролизе хлопка. Анализ методом Евклидовых расстояний зависимостей $\Phi(t)$ выполнялся на участках зависимостей, расположенных в окрестности момента времени, когда оптическая плотность задымленной среды достигала значения 0,2 дБ/м, по 50 секунд до и после этого момента, времени. Характеристические кривые, полученные для процессов тления, пиролиза хлопка при температурах 500 °С, 600 °С и 700 °С и в условиях отсутствия дыма, представлены на рисунке 1.

Из рисунка 1 видно, что в рассматриваемых условиях Евклидовы расстояния изменялись от двух до двадцати шести единиц. Евклидово расстояние равное двум единицам соответствует не изменяющейся величине потока излучения за интервал измерения. Евклидово расстояние изменяется от пяти до двенадцати единиц для процесса пиролиза при 600 °С и от семи до двадцати шести единиц для пиролиза при 700 °С. Наибольший процент повторений одинаковых Евклидовых расстояний в процессе пиролиза при 600 °С не превысил двадцать шесть, а в пиролизе

при 700 °С – девятнадцать. В процессах пиролиза при 500 °С и тления Евклидовы расстояния изменяются от двух до пяти единиц, наибольший процент повторений в обоих случаях соответствует двум единицам евклидоваго расстояния и составляет сорок три процента для процесса пиролиза при 500 °С и тридцать семь процентов для тления.

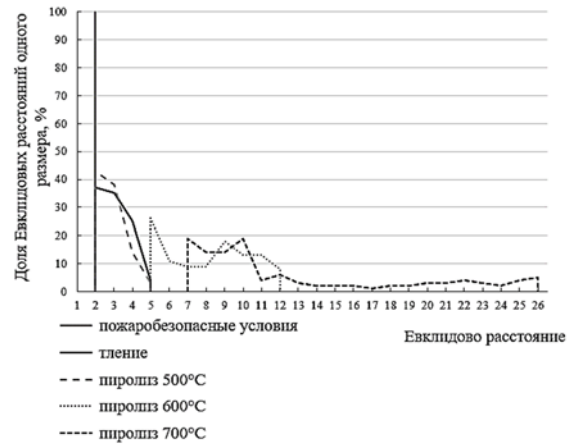


Рисунок 1 – Характеристические кривые процессов пиролиза и тления

Характеристические кривые процессов тления и пиролиза при 500 °С имеют более чем в два раза меньший процент повторений Евклидовых расстояний длиной две единицы, чем в случае «чистой» среды. Ширина интервала изменения Евклидовых расстояний для двух этих процессов равна трём единицам, а в случае «чистой» среды в наборе вычисленных Евклидовых расстояний встречаются только отрезки длиной две единицы. Характеристическая кривая процесса пиролиза хлопка при 600 °С не пересекается с характеристическими кривыми процессов тления и пиролиза при 500 °С. Она смещена в область больших евклидовых расстояний, имеет ширину интервала изменения евклидовых расстояний семь единиц. Характеристическая кривая процесса пиролиза при 700 °С пересекается с характеристической кривой процесса пиролиза при 600 °С на интервале от семи до двенадцати единиц Евклидоваго расстояния. При этом проценты повторений одинаковых Евклидовых расстояний на данном интервале у двух рассматриваемых характеристических кривых близки. Характеристическая кривая процесса пиролиза при 700 °С имеет значительно более широкий интервал изменения Евклидовых расстояний: девятнадцать единиц. Абсолютные значения евклидовых расстояний в этом случае принимают наибольшие значения среди всех рассматриваемых характеристических кривых.

Заключение. Показано, что расчётный метод Евклидовых расстояний позволяет наблюдать особенности динамики изменения пропускающей способности среды, задымленной в резуль-

тате высокотемпературных процессов пиролиза и тления хлопчатобумажных фитилей. Ширина интервалов изменения Евклидовых расстояний для процессов тления и пиролизом при 600 °С и 700 °С составила 3, 7 и 19 единиц соответственно. Абсолютные величины Евклидовых расстояний принимают наибольшие значения в процессе пиролиза при 700°С, наименьшие для процесса тления. Процент повторения Евклидовых расстояний одной величины в рассматриваемых процессах отражают динамику изменения пропускающей способности задымленной среды.

В условиях «чистой» среды доля Евклидовых расстояний длиной две единицы составила сто процентов, что соответствовало неизменяющемуся потоку прошедшего излучения.

Интервал изменения и абсолютные величины Евклидовых расстояний для всех исследуемых процессов горения больше, чем для условий чистой среды. Что позволяет применять метод Евклидовых расстояний не только в целях обнару-

жения процессов тления и пиролиза хлопковых изделий в помещении, но и разделять процессы тления, низкотемпературного пиролиза от процессов пиролиза при высокой температуре нагревательной поверхности. Характеристические кривые процессов тления и пиролиза при температуре 500 °С оказались схожи

Литература

1. Зуйков И.Е., Антошин А.А., Олефир Г.И., Третьяк И.Б. Установка, моделирующая пожары в начальной стадии развития. Достижения физики неразрушающего контроля и технической диагностики: сб. науч. тр. – Мн.: Институт прикладной физики НАН Беларуси, 2011. – 226с.

2. Антошин, А.А. Измерение интенсивности прошедшего и рассеянного вперед оптического излучения в задымленной среде / А.А. Антошин, А.А. Безлюдов, В.И. Никитин // Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы XXXI Междунар. науч.-практ. конф.; редкол.: Е.Ю. Сушкина (ответственный редактор) [и др.]. – М.: ВНИИПО, 2019. – 707 с.

УДК 681.306

ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ МДП-ТРИОДНОЙ СТРУКТУРЫ

Глухманчук В.В., Сычик В.А., Уласюк Н.Н.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

МДП-триодные структуры широко используются в первичных преобразователях электромагнитных излучений [1, 2]. Такие структуры представляют аналог МДП-транзистора (рисунок 1).

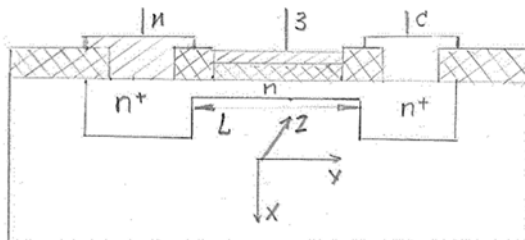


Рисунок 1 – МДП-триодная структура

Истоковая и стоковая области n^+ -типа в МДП-триодной структуре (рисунок 1) отстоят друг от друга на расстояние, равное длине канала L , его направление совпадает с осью Y , а направление в глубину полупроводниковой (Si) подложки принимается за X . Направление ширины канала W соответствует оси Z . Питающее напряжение $U_{си} = V_c - V_n$ соответствует разности потенциалов истока и стока, а управляющий потенциал затвора определяется интенсивностью контролируемого электрического поля E_x . Суммарный заряд под затвором Q_s равен заряду на проводящем электроде затвора с напряженностью E_x , $Q_x = \epsilon\epsilon_0 E_x S$, S – площадь электрода затвора. Выходной ток I_c связан с полным зарядом

в канале Q_s через время пролета t_r уравнением $I_c = Q_s / t_r$. Полный заряд

$$Q_s = Q_n WL = C_{0x} (V_3 - V_T) WL, \quad (1)$$

где Q_n – удельный заряд носителей в канале; V_T – пороговое напряжение.

Удельный заряд затвора при данном значении V_T запишется

$$Q_n = \epsilon\epsilon_{0x} E = \frac{\epsilon\epsilon_{0x}}{d_{0x}} (V_3 - V_T), \quad (2)$$

где ϵ_{0x} , d_{0x} – относительная диэлектрическая проницаемость и толщина диэлектрика затвора; C_{0x} – удельная емкость затвора относительно поверхности полупроводника.

Рассмотрим произвольное сечение канала, в котором плотность тока j_c не зависит от Z , но меняется по оси X из-за убывания концентрации электронов. В пределах элементарной площади ZdX плотность тока принимается постоянной и следовательно

$$dI_c(X) = j_c(X) W dX = en(X) \mu E_y W dX. \quad (3)$$

Учитывая малую толщину канала, пренебрегается зависимость составляющей поля E_y от координаты X вплоть до границы канала с обедненным слоем, т.е. считаем $E_y = \text{const}$. Тогда, интегрируя (4) в пределах от 0 до h , получаем

$$I_c = \mu E_y W \int_0^h en(X) dX = \mu W Q_s E_y. \quad (4)$$

Заменяя E_y на dU_y/dY , получаем

$$I_c = \mu WC_{ox} [(V_3 - U_y) - V_{SF} - \frac{a}{C_{ox}} \sqrt{U_y}] \frac{dU_y}{dY}. \quad (5)$$

Здесь V_{SF} – напряжением плоских зон; $a = (2e\epsilon_0\epsilon_n N_D)^{1/2}$; ϵ_n – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника; N_D – концентрация донорной примеси.

Умножив обе части уравнения (5) на dY и интегрируя левую часть в пределах от 0 до L , а правую – от V_{SF} до U_c , находим искомую вольт-амперную характеристику МДП-структуры.

$$I_c = B[(U_3 - V_{T0} - V_{SF})U_c - \frac{1}{2}U_c^2 - \frac{2}{3}\frac{a}{C_{ox}}(V_{SF} + U_c)^{3/2} - V_{SF}^{3/2}]. \quad (6)$$

Параметр B , называемый удельной крутизной, имеет значение

$$B = \frac{\mu WC_{ox}}{L} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ox} \mu W}{L d_{ox}}.$$

Заменяв в (6) $V_{T0} - V_{SF}$ на полное пороговое напряжение V_T , а членами с коэффициентами a/C_{ox} обычно пренебрегают, окончательно получаем

$$I_c = B[(V_3 - V_T)U_c - 1/2U_c^2], \quad (7)$$

которая достоверна для напряжений $U_c < U_{c.n.}$

Напряжение насыщения находится из (7), полагая $dI_c/dU_c = 0$:

$$U_{c.n.} = V_3 - V_T. \quad (8)$$

Величина тока $I_c(U_{c.n.})$ сохраняется при всех значениях $U_c > U_{c.n.}$. Поэтому, подставляя (8) в (7), получаем вольт-амперную характеристику МДП-структуры в режиме насыщения:

$$I_c = \frac{1}{2} B (V_3 - V_T)^2. \quad (9)$$

Если используется МДП-структура со встроенным каналом, то принимается

$$V_T = 0, \\ I_c \cong \frac{1}{2} B V_3^2. \quad (10)$$

В (10) потенциал затвора V_3 связан с воздействующим на электрод затвора полем E_x соотношением

$$V_3 = \frac{Q}{C_{ox}} = \frac{4\pi\epsilon_0 E_x S}{C_{ox}} = B E_x.$$

Крутизна МДП-структуры в режиме насыщения $S = B(V_3 - U_o)$, т.е. линейно зависит от эффективного напряжения на затворе, причем она однозначно связана с током

$$S = (2 B I_c)^{1/2}. \quad (11)$$

Семейство выходных характеристик $I_c = f(U_{c.n.})/V_s = const$ для МДП-триодной структуры со встроенным каналом представлено на рисунке 1б, причем зависимость $I_c = f(U_{cu})/V_3 = 0$ на отрезке ОА описывается выражением (6), а на отрезке АВ ВАХ эта зависимость соответствует выражению (9).

Переходная (сток-затворная) характеристика МДП-триодной структуры $I_c = f(V_3)/U_{cu} = const$ при $U_c > U_{c.n.}$ приведена на рисунке 1, отрезок $(-2B, +2)$ ВАХ удовлетворительно описывается зависимостью (10).

Анализ выражений (9)–(11) показывает, что контроль напряженности внешних электрических полей E_x посредством МДП-приборной структуры с изолированным затвором, которая служит приемником E_x , является эффективным и позволяет с высокой точностью оценить величину E_x в широком диапазоне ее значений при условии $U_c \geq U_{c.n.}$

Таким образом, МДП-приборная триодная структура с изолированным затвором и встроенным каналом может быть использована в качестве первичного измерительного преобразователя внешних электрических полей и является оптимальной структурой чувствительного элемента преобразователя.

Литература

1. Сычик В.А. Измерительные преобразователи излучений на основе полупроводниковых структур. – Мн.: Выш. школа, 1991. – 179 с.
2. Лейтман М.Б. Нормирующие измерительные преобразователи электрических сигналов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.

УДК 681.2

МЕТОДИКА И УСТРОЙСТВО БАЛАНСИРОВКИ МАЯТНИКА С ОПОРОЙ НА ОДИН ШАРИК

Джилавдари И.З., Ризноокая Н.Н., Касьмин В.Ю., Матвиевич В.Г.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Приборы, в которых используется метод свободных качаний физического маятника, опирающегося через тело качения (шарики, ролики, ребро призмы (или ножа)), на плоскую площадку (или подушку), давно используются для измерения твердости и прочности материалов и изделий [1–8]. Однако, маятник с двумя опорами имеет очевидный недостаток: его можно применять только при наличии двух одинаковых исследуемых образцов. Это существенно снижает номенклатуру испытываемых материалов. Кроме того, здесь существует проблема идентичности образцов и опор.

При использовании маятникового прибора с опорой на один шарик возникает проблема неустойчивости вертикальной плоскости качаний маятника. Это требует точной статической балансировки по двум главным горизонтальным осям инерции.

Второй проблемой маятника с одной опорой, является его вращение. При движении основания маятника (опоры шарика) с ускорением на шарик со стороны опоры действует единственная сила – сила трения. Если эта сила меньше максимальной силы трения покоя, маятник будет двигаться поступательно вместе с основанием без скольжения, если центр масс маятника совпадает с точкой касания шарика и опоры, то момент силы трения относительно центра масс маятника равен нулю. Поэтому маятник не будет вращаться. Для выполнения данного условия, требуется балансировка в вертикальной плоскости.

Авторами разработано устройство, показанное на рисунке 1, позволяющее балансировать этот маятник.

Балансировка производится следующим образом:

В горизонтальной плоскости.

1. Две стеклянные плоскопараллельные призмы (например, по ГОСТ 1121-54) устанавливают одну на другую, и, используя пузырьковый уровень, с помощью регулировочных винтов, добиваются горизонтального положения поверхности верхней призмы.

2. На экране отмечают положение луча лазера, отраженного от этой поверхности.

3. Снимают верхнюю призму и устанавливают на ее место маятник (призма и маятник должны быть одинаковой высоты) с помощью подъемного устройства.

4. Регулируют балансировочные винты маятника до тех пор, пока отраженный от его зеркала луч не совпадет с отметкой на экране.

В вертикальной плоскости.

5. Устанавливают маятник на плоскопараллельный брусок и перемещают этот брусок с небольшим ускорением в направлении, перпендикулярном длинной оси маятника. Наблюдают направление отклонения маятника в начале движения. Регулируя вертикальные балансировочные грузы маятника, добиваются того, чтобы в начале перемещения бруска маятник сохранял состояние покоя.

Повторяют пункты 1–4 статической балансировки.

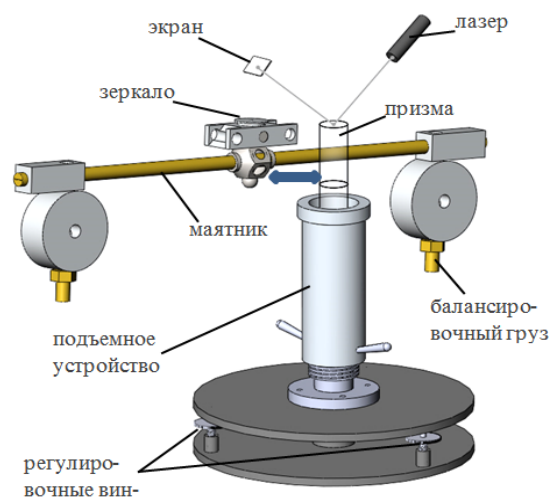


Рисунок 1 – Балансировка маятника с одним шариком

Результатом балансировки по пункту 5 является совпадение положения центра масс маятника на пятне контакта.

В идеале, когда маятник качается без поперечных колебаний и нет шума, траектория движения маятника должна иметь форму прямой вертикальной линии. Однако реальная траектория напоминает фигуру Лиссажу (рисунок 2).

Если траектория имеет наклон к оси Y , ось XU матрицы поворачивается относительно лазерного луча, пока не получится прямое движение вдоль оси Y пятна с отклонением вдоль оси X в пределах один пиксель, который соответствует ошибке оптической системы (повидимому, получить лучший результат невозможно).

Это можно сделать, запустив маятник с большой осторожностью, и, кроме того, необходимо начинать регистрировать колебания маятника не с самого начала, а несколько позже, когда боковые колебания маятника практически исчезнут (рисунок 3).

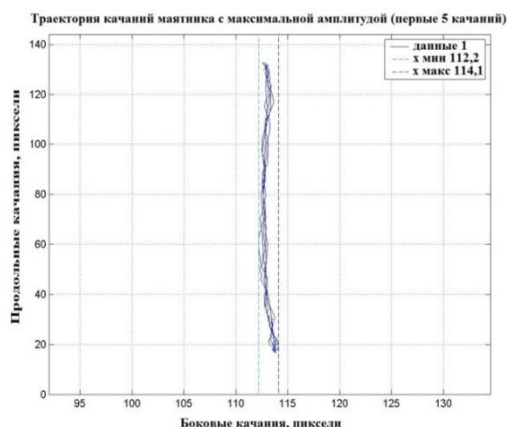


Рисунок 2 – Траектория качаний маятника с максимальной амплитудой

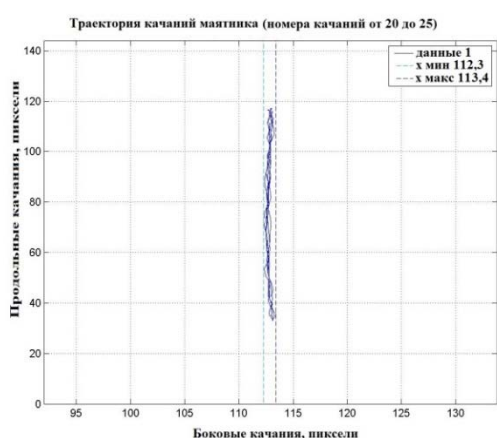


Рисунок 3 – Траектория качаний маятника

Проведенные экспериментальные исследования показали, что маятник сбалансированный по приведенной методике, характеризуется устой-

чивыми колебаниями в одной плоскости и уровень влияние вибраций основания на период колебаний маятника для данной конструкции маятника оказался значительно ниже, чем в маятниках, в которых условия невозмущаемости не соблюдалось.

Литература

1. Менделеев, Д.И. Опытное исследование колебания весов и возобновление прототипа или основной образцовой русской меры массы в 1893-1898 гг. / Д.И. Менделеев. С предисл. М.А. Шателена. – Л. Гос. науч.-техн. изд-во, Ленхимсектор, 1931. – 302 с.
2. Herbert, E.G. Some Recent developments in hardness testing / E.G. Herbert // *The Engineer*. – 1923. – Vol. 135. – P. 686–687.
3. Авдеев, Б.А. Испытательные машины и приборы / Б.А. Авдеев. – М.: Машгиз, 1957. – 354 с.
4. Halama, R. Mechanics of Herbert Pendulum Hardness Tester and its Application / R. Halama [et al.] // *Key Engineering Materials*. – Trans Tech Publications Ltd, 2017. – Vol. 741. – P. 122–127. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.741.122>.
5. Matsubara, M. Improved Herbert hardness tester / M. Matsubara and K. Sakamoto // *Experimental Techniques*. – 2012. – Vol. 36. – №. 3. – P. 73–76. [doi:10.1111/j.1747-1567.2011.00736.x](https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2011.00736.x).
6. Suzuki, R. Hardness Measurement for Metals Using Lightweight Herbert Pendulum Hardness Tester With Cylindrical Indenter / R. Suzuki [et al.] // *Experimental Techniques*. – 2016. – Vol. 40. – №. 2. – P. 795–802. [doi:10.1111/ext.12121](https://doi.org/10.1111/ext.12121).
7. Heins, R.W. An Evaluation of the Rehbinder-Kuznetsov Pendulum Technique In Hardness Measurements / R.W. Heins and N. Street // *Society of Petroleum Engineers Journal*. – 1965. – Vol. 5, №. 02. – P. 177–183. <https://doi.org/10.2118/1048-PA>.
8. ГОСТ 5233-89. Материалы лакокрасочные. Метод определения твердости покрытий по маятниковому прибору. – Введен: 01.01.1990. – М.: ИПК издательство стандартов, 2003. – 5 с.

УДК 621.83.52

УСТРОЙСТВА РАЗВЯЗКИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГО УРОВНЯ ПОМЕХ СО СТОРОНЫ МОЩНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Смолина Е.В.

ФГБУН «Институт лазерной физики» СО РАН
Новосибирск, Российская Федерация

При запуске энергетического оборудования, входящего в состав установки для моделирования процессов солнечной плазмы КИ-1 ИЛФ СО РАН, в процессе проведения эксперимента, возникает проблема, обусловленная воздействием окружающей электромагнитной обстановки на систему транспорта импульсов синхронизации измерений. Следствием такого воздействия является несвоевременное срабатывание измерительного оборудования, которое приводит к ложным запускам регистрирующих систем и срывам процесса измерения.

В настоящее время система транспорта импульсов синхронизации измерений (триггера) на установке КИ-1 ИЛФ СО РАН выполнена на основе коаксиального кабеля, сами импульсы триггера генерируются секвенсором на основе генераторов задержанных импульсов ГЗИ-6, размещенных в защищенном зале. Этот же секвенсор генерирует импульсы зажигания водородных тиратронов силовых цепей установки. Для ограничения величины наведенного на оплетку кабеля тока используется дополнительное экранирование, а для ограничения области растекания

наведенного тока используется развязывающее устройство на основе разделительного импульсного трансформатора. Однако, достигнутый уровень надёжности запуска измерительной аппаратуры оказался недостаточным, т.к. заметная часть измерений происходила не по триггеру, а по помехе от срабатывания тиратронов, в связи с чем было необходимо уменьшить проникновение помехи, не ухудшая точность привязки измерений к триггеру. При анализе ситуации было выявлено, что основной проблемой является неидеальность применяемого развязывающего трансформатора, а именно, паразитная ёмкость между витками и обмотками [1].

Под действием утечек мощности со стороны энергетических систем, в кабеле наводятся токи, которые можно разделить на две группы: токи, наведённые на внешней стороне оплётки кабеля и токи, наведённые на внутренней поверхности оплётки и поверхности жилы кабеля. Паразитная ёмкость позволяет напряжению помехи, наводимому на наружной стороне оплётки кабеля, проникать в виде тока на его внутреннюю сторону, т.е. преобразует синфазную помеху в дифференциальную [2]. При типичной для применяемых на КИ-1 ИЛФ СО РАН тиратронах скорости нарастания напряжения 10^{10} В/сек и паразитной проходной ёмкости трансформатора 1 пФ, ток дифференциальной помехи составит 10 мА на каждый Вольт синфазной помехи, а соответствующее эквивалентное сопротивление проникновения будет составлять величину порядка 100 Ом. Для среды с характеристическим волновым сопротивлением 50 Ом это означает, что коэффициент проникновения помехи имеет значение приблизительно -10 дБ, что и объясняет неудовлетворительную работу цепей синхронизации измерительной аппаратуры. На рисунке 1 приведены осциллограммы для выходного сигнала широкополосного импульсного трансформатора. Луч C1 – выходной сигнал развязывающего устройства, луч C2 – контрольный сигнал с выхода генератора, эквивалент 300 В, скорость развертки 500 нс/деление.

Применение для синхронизации измерительных систем серийно выпускаемых оптронов интегральной компоновки бесперспективно, поскольку их паразитная ёмкость имеет величину, сравнимую с паразитной ёмкостью трансформатора – порядка 1 пФ, а, следовательно, и проникновение помехи приблизительно -10 дБ. К тому же, если трансформатор передаёт сигнал триггера с ослаблением 0 дБ, то оптрон передаёт только 1 % сигнала, т.е. -40 дБ. Очевидно, что оптрон существенно проигрывает трансформатору [3].

Для решения задачи надёжного транспорта сигнала триггера было предложено и изготовлено развязывающее устройство (фильтр) на основе широкополосного синфазного трансформато-

ра на длинной линии [4, 5]. Устройство переносит сигнал триггера от потенциала кабельной линии, идущей из защищённого зала, к потенциалу экранированного объёма на установке, в котором размещена измерительная аппаратура, а затем к потенциалам корпусов самой измерительной аппаратуры. Соответственно, устройство выполнено по двухкаскадной схеме, где первый каскад используется для получения, нормализованного относительно местного потенциала экранированного объёма, квазидифференциального сигнала умеренной амплитуды, а второй каскад – для получения разветвленного сигнала с «мягкой» связью местного потенциала и корпусов регистрирующей аппаратуры.

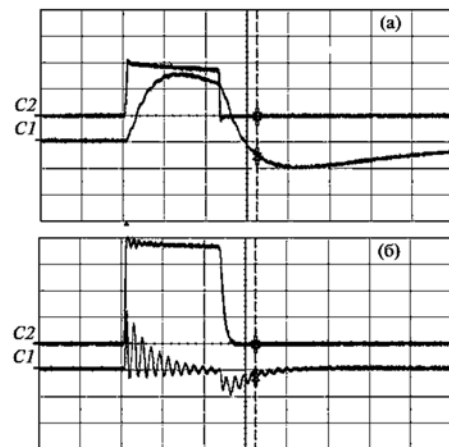


Рисунок 1 – Выходной сигнал развязывающего устройства на основе широкополосного импульсного трансформатора:

a – дифференциальная мода; *b* – синфазная мода.

Масштаб по вертикали: C1 – 5 В/деление;

C2 – 150 В/деление, по горизонтали: 500 нс/деление

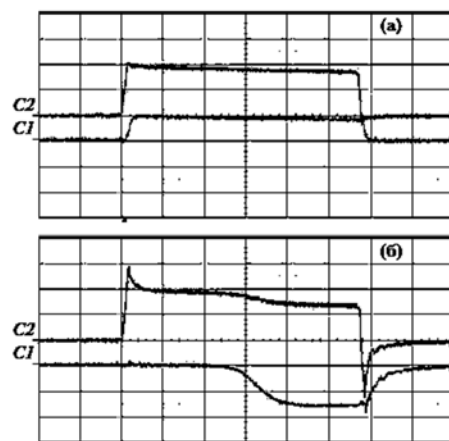


Рисунок 2 – Выходной сигнал развязывающего устройства:

a – дифференциальная мода; *b* – синфазная мода.

Масштаб по вертикали: C1 – 5 В/деление;

C2 – 150 В/деление, по горизонтали: 200 нс/деление

Ослабленный до умеренной амплитуды сигнал подается на вход синфазного трансформато-

ра, который выполнен двадцатью двумя витками бифилярно свитого провода МГТФ-0.05, с волновым сопротивлением искусственной линии около 100 Ом на четырёх кольцах К10×7×6 из феррита М2000НМ-5. Симметричная структура выхода позволяет замкнуть остаточные токи синфазной моды на местную землю, независимо от токов сигнала триггера. Трансформатор пропускает сигнал дифференциальной моды без изменений, а для сигнала синфазной моды представляет собой индуктивность. Ослабление синфазной моды существенно выше, чем для дифференциального сигнала. Структура выбрана так, что на выходе каскада присутствует парафазный относительно местного потенциала корпуса экранированного объема сигнал размахом ±12 В.

Второй каскад так же построен на основе синфазного трансформатора Т2, идентичного по исполнению. Он принимает парафазный сигнал триггера и переносит его без изменения на потенциал корпусов измерительной аппаратуры, где амплитуда ослабляется до желательного уровня около 1–5 В, а затем разветвляется на измерители. Так же, как и на входе, имеется переключатель, позволяющая оптимизировать поведение уравнивающих токов, приходящих на корпуса измерителей по сигнальным кабелям со стороны датчиков. На рисунке 2 представлены осциллограммы сигналов с выхода одного из четырёх идентичных друг другу кабелей. Луч, обозначенный С1 – выходной сигнал второго каскада устройства, луч С2 – контрольный сигнал с выхода генератора, эквивалент 300В, скорость развёртки 200 нс/деление, длительность фронта 20 нс.

Выводы. Спроектировано и изготовлено развязывающее устройство цепи транспорта сигнала

триггера для синхронизации системы регистрации установки КИ-1 ИЛФ СО РАН.

Фронт дифференциального сигнала триггера, по сравнению с исходным устройством, улучшен с 300 нс до 30 нс. Измеренное проникновение синфазной помехи с фронтом 20 нс в цепь сигнала не превышает 80 дБ, что существенно лучше 26 дБ для исходного устройства. Устройство испытано с синфазными импульсами амплитудой до 600 В. Достигнута надёжная синхронизация системы регистрации установки КИ-1 ИЛФ СО РАН в реальных условиях экспериментов.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта №18-12-00080.

Литература

1. Кондаков Е.В. Изучение широкополосного трансформатора для студентов физического факультета ЮФУ, направлений подготовки «Радиофизика» и «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» / Е.В. Кондаков. – ЮФУ, 2014. – 19 с.
2. Денисенко В. Заземление в системах промышленной автоматизации / В. Денисенко. – Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 2. – С. 94–96.
3. Смолина Е.В. Быстродействующий преобразователь тока с оптоволоконной развязкой / Е.В. Смолина. – Приборы и техника эксперимента. – 2019. – № 6. – С. 46–48.
4. Ред Э.Т. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике: схемы, блоки, 50-омная техника / Э. Ред; пер. с нем. С.Н. Шибалова; под ред. Ю.А. Лурье. – М.: Мир, 1990. – 256 с.
5. Лондон С.Е. Справочник по высокочастотным трансформаторным устройствам / С.Е. Лондон, С.В. Томашевич. – М.: Радио и связь, 1984. – 216 с.

**Секция 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ**

УДК 621.793

**МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ, МАГНИТОРЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА ЛАВСАНА,
С УГЛЕРОДНЫМ ПОКРЫТИЕМ МОДИФИЦИРОВАННОГО КЛАСТЕРАМИ МЕТАЛЛОВ**
Анисович А.Г.¹, Акула И.П.¹, Жуковский П.В.², Маркевич М.И.¹, Щербакова Е.Н.³, Чекан Н.М.¹

¹Физико-технический институт НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

²Люблинский технический университет
Люблин, Республика Польша

³Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Электромагнитное излучение оказывает вредное влияние на здоровье человека. Об этом свидетельствуют медицинские данные и биологических исследований, которые проводятся в мире [1, 2]. Задачи по снижению уровня электромагнитных излучений решаются путем создания радиопоглощающих материалов. Такая задача может быть решена, в частности, нанесением различного рода радиопоглощающих покрытий. Получение радиопоглощающих материалов зависит от многих факторов, в том числе и от способа получения, химического состава покрытия [3–5].

Весьма важным в настоящее время является создание материалов на основе тканых материалов. Синтез таких композиционных материалов и исследование их структуры актуальны с точки зрения практических применений.

Углеродные покрытия используются в оптической промышленности, в полупроводниковых устройствах и т.д. Кроме того, такие покрытия имеют биологическую совместимость и не вызывают токсичных и воспалительных реакций.

В настоящей работе для усиления радиопоглощающих свойств углеродные покрытия были подлегированы кластерами металлов из нержавеющей стали. Для исследования использовалась ткань лавсана производства ООО «Моготекс».

Покрытия наносились на ткань методом импульсного катодно-дугового осаждения в вакууме $3,5 \cdot 10^{-3}$ Па. Покрытие углерода осаждалось комбинированным PVD-CVD методом. Продукты данного взаимодействия осаждаются на ткани в виде аморфного углерода.

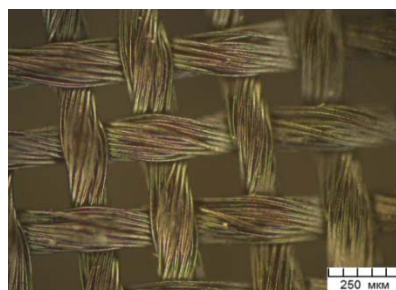
Предварительно перед формированием покрытий поверхность ткани обрабатывалась высокоэнергетическими ионами аргона для удаления органических загрязнений в течение 15 минут при следующих параметрах: давление аргона в вакуумной камере порядка $3,2 \cdot 10^{-2}$ Па, ускоряющее напряжение 2 000 В, ионный ток (20–40) мА, частота следования импульсов 2,5 Гц. Процесс подлегирования производился в два этапа.

Наносилось покрытие из стали 12Х18Н10Т на ткань методом импульсного катодно-дугового осаждения в среде аргона при давлении

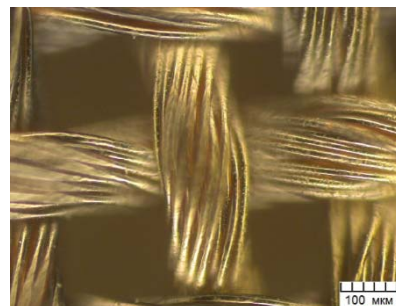
$P = 1,5 \cdot 10^{-2}$ Па. Покрытие осаждалось с использованием источника стационарной металлической плазмы, работающего в режиме сепарации. Процесс проводился путем чередования периодов работы источника плазмы (1 минута) и паузы для охлаждения ткани (1 минута); производилось 20 циклов.

После этого покрытие углерода осаждалось с использованием импульсно-дуговых источников в среде ацетилена при давлении $P = 0,5$ Па. Было сделано 10000 разрядных импульсов.

Для исследования морфологии поверхности волокна использовали металлографический комплекс на основе инвертированного микроскопа МИ-1 с освещением по методу темного поля [6]. Морфология поверхности ткани с покрытием при различном увеличении представлена на рисунках 1 и 2.



a



б

Рисунок 1 – Морфология поверхности лавсана с покрытием углерода, подлегированного ионами металлов:

a, б – поверхность ткани в темном поле

Использование темнопольного освещения позволяет визуализировать как общую морфологию поверхности, так и отдельное волокно. Темнопольная микроскопия основана на рассеивании света микроскопическими объектами, в том числе теми, размеры которых меньше предела разрешения светового микроскопа.

Свет от осветителя и зеркала проходит через темнопольный конденсор, который формирует световой пучок в виде полого конуса и направляет его на объект наблюдения. Роль конденсора в отраженном свете выполняет эллиптическое зеркало, одетое на оправу объектива. По выходе из конденсора основная часть лучей проходит мимо объектива. Изображение формируется при помощи небольшой части лучей, рассеянных микрочастицами объекта наблюдения внутрь конуса и прошедшими через объектив.

Таким образом, в поле зрения на тёмном фоне видны светлые изображения элементов структуры объекта, отличающиеся от окружающей среды показателем преломления. Принцип формирования изображения при использовании темного поля предполагает освещение объекта полым конусом света; при этом только наклонные участки объекта являются освещенными.

Поверхность объекта в данном случае практически не имеет горизонтальных участков, поэтому в темном поле «светится» каждое волокно. Покрытие лежит равномерно, без заметных отслоений и дефектов. Присутствует каплевидная фаза (рисунок 2).

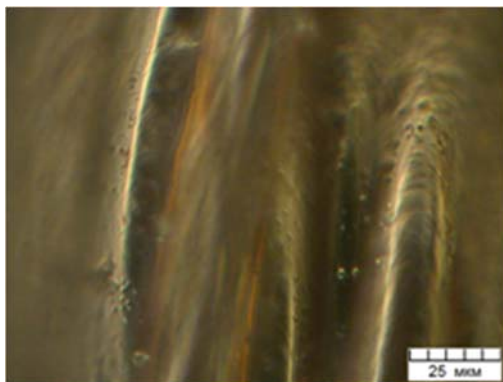


Рисунок 2 – Морфология поверхности лавсана с покрытием углерода, подвергнутого ионной металлизации в темном поле

Исследования магнитного резонанса проводились на специализированном малогабаритном анализаторе ЭМР «Минск 22» при комнатной температуре. Рабочая длина волны – 3 см. Максимальное значение индукции магнитного поля – 450 мТл, частота модуляции – 30 кГц.

На рисунке 3 приведен спектр магнитного резонанса лавсановой ткани с нанесенным углеродным покрытием, подвергнутой кластеризации металлов.

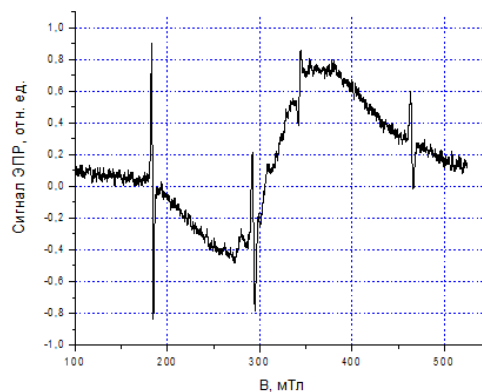


Рисунок 3 – Спектр магнитного резонанса синтезированного композиционного материала

На спектре фиксируется широкая, асимметричная спектральная линия шириной 90,6 мТл с эффективным значением g-фактора $2,34 \pm 0,01$, что соответствует высокой концентрации магниторезонансных центров и определяется в основном кластерами металлов (железо, никель, хром и др.). Кроме того на спектре ЭПР просматривается линия от кластеров углерода (узкая спектральная линия с эффективным значением g-фактора $2,02 \pm 0,01$, ширина линии составляет 1,7 мТл).

Таким образом, синтезированный композиционный материал обладает магниторезонансным поглощением.

Литература

1. Lutsev L.V., Microwave Properties of Granular Amorphous Carbon Films with Cobalt Nanoparticles / L.V. Lutsev, S.V. Yakovlev, T.K. Zvonareva [et.al.] // Journal of Applied Physics. – 2005. – V. 97, №. 10. – P. 104327.
2. Луцев Л.В. Многоцелевые радиопоглощающие материалы на основе магнитных наноструктур: получение, свойства и применение / Л.В. Луцев, Г.А. Николайчук, В.В. Петров // Нанотехника. – 2008. – № 2(14). – С. 37–42.
3. Адашкевич С.В. Экспресс-диагностика магниторезонансных свойств некоторых порошков ферритов / С.В. Адашкевич, В.Ф. Стельмах, А.Г. Бакаев [и др.] // Электроника – Инфо. – 2016. – № 2. – С. 38–40.
4. Адашкевич С.В. Экспресс-диагностика поглощения СВЧ композиционным материалом на основе гетероцепных волокон / С.В. Адашкевич, А.Г. Бакаев, М.И. Маркевич // Электроника – Плюс. – 2018. – № 2. – С. 60–63.
5. Анисович А.Г. Морфология поверхности и диагностика магниторезонансного поглощения энергии СВЧ лавсана, модифицированного кластерами углерода / А.Г. Анисович, И.П. Акула, М.И. Маркевич / Материалы V Международной научно-практической конференции «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния». – 16–17 мая 2019. – С. 202–203.
6. Анисович А.Г. Искусство металлографии: использование методов оптического контрастирования А.Г. Анисович // Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 1. – С. 36–42.

УДК 539.172.12

АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНТРОЛЯ ДОЛГОЖИВУЩИХ β -ИЗЛУЧАЮЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАДИОФАРМПРЕПАРАТОВ НА ОСНОВЕ ^{18}F

Бринкевич Д.И.¹, Бумай Ю.А.², Киевицкая А.И.³, Кийко А.Н.⁴

¹Белорусский государственный университет

Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

³Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова

Белорусского государственного университета

Минск, Республика Беларусь

⁴Белорусский государственный институт метрологии

Минск, Республика Беларусь

Более 80 % всех процедур медицинской визуализации, назначаемых для диагностики онкологических, неврологических и кардиологических заболеваний невозможно осуществить без специальных радиофармацевтических препаратов (РФП). Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) является одним из основных методов ранней диагностики [1]. Наиболее распространенным радионуклидом для ПЭТ-диагностики является ^{18}F , который получают по (p, n) реакции при облучении протонами с энергией 9–18 МэВ обогащенной по кислороду ^{18}O (до 95–97 %) воды (H_2^{18}O).

Материалы мишени ускорителя в ходе обработки [^{18}F] фторида под воздействием высокоэнергетических протонов и нейтронов подвергаются сильной активации. В условиях облучения вода под давлением 25–30 атм. выщелачивает продукты активации из тела и окна мишени, вследствие чего происходит загрязнение радионуклидными примесями раствора [^{18}F] фторида. В последующем, это может приводить к попаданию указанных радионуклидов в готовый радиофармпрепарат и образованию твердых и жидких радиоактивных отходов [2, 3]. При увеличении накопленной мишенью дозы свыше 2 500 мкА·ч усиливаются процессы коррозии/эрозии материалов мишени и, соответственно, растет эффективность выщелачивания радионуклидов. Это приводит к резкому росту концентрации γ -радионуклидов в регенерированной воде, картриджах сорбционной очистки и готовой лекарственной форме [3]. Ранее контроль содержания образующихся в процессе производства РФП β -излучающих радионуклидов методом сцинтилляционной спектроскопии не проводился.

β -излучающие радионуклиды представляют повышенную опасность при попадании в организм человека. Испускаемые при β -распаде электроны обуславливают радиолитический распад нескольких десятков молекул из ближайшего окружения, что приводит к потере ими биологической активности.

Цель настоящей работы – разработка методического и аппаратного обеспечения контроля

β -излучающих радионуклидов в процессе производства радиофармпрепаратов на основе ^{18}F для минимизации дозовых нагрузок пациентов и производственного персонала.

Материалы и методы измерений. Нарботку радионуклида ^{18}F осуществляли на ускорителе Cyclone 18/9 НС (IBA, Бельгия) при облучении протонами с энергий 18 МэВ воды, обогащенной по ^{18}O до 98 % (Центр молекулярных исследований, Россия). Использовали ниобиевую мишень объемом 3,2 мл с входным окном из сплава Navar толщиной 25 мкм.

Контроль содержания β -излучающих радионуклидов проводился с использованием автоматического жидкостного сцинтилляционного спектрометра с TDCR регистрацией HIDEX 300 SL и гамма-бета-спектрометра МКС-АТ1315. Для HIDEX 300 SL энергетический диапазон составил 0–2 МэВ по β -частицам, интервал – 0,182 кэВ/канал, эффективность – более 26 % (для трития), более 95 % (для ^{14}C). Средний фон для β -частиц – 9 имп/мин. Для МКС-АТ1315 диапазон энергий бета-излучения: 0,15–3,5 МэВ. Средний фон для β -частиц – 270 имп/мин, чувствительность для ^{90}Sr в геометрии 0,03 л – $3,5 \cdot 10^{-3}$ имп·л/(с·Бк). Использован жидкий сцинтиллятор на основе толуола. Пробы объемом 1 мл разводились в 10 мл жидкого сцинтиллятора. Время измерения β -спектра – 1 000 с.

Идентификацию γ -излучающих радионуклидов и определение их активности выполняли с использованием спектрометра на особо чистом германии: детекторная система GEM40-83/DSPEC jr 2.0; энергетический диапазон 14,5–2911,4 кэВ; разрешение 0,182 кэВ/канал.

Эксперимент. На рисунках 1 и 2 приведены β -спектры облученной воды [^{18}O]H₂O и готового РФП [^{18}F]NaF при использовании мишени с накопленной дозой около 5 000 мкА·ч. Они кардинально отличаются от аналогичного спектра после облучения «чистой» мишени с накопленной дозой менее 500 мкА·ч (рисунок 1). Кроме максимума, обусловленного ^3H , на спектрах наблюдается еще ряд максимумов как в низко-,

так и в высокоэнергетической части спектра. Причем хранение в течение 3 месяцев приводит к существенной трансформации спектров – резко снижается интенсивность низкоэнергетического крыла спектра регенерированной воды, исчезает максимум в области 300 канала, в то время как интенсивность высокоэнергетического крыла (от 450 до 700 канала) снижается не столь кардинально. Это указывает на присутствие ряда β -излучающих нуклидов с разной энергией испускаемых электронов и периодом полураспада. Их суммарная активность в первые несколько недель после синтеза значительно превышает активность трития. Сильное излучение в низкоэнергетической области β -спектров регенерированной воды $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$ при облучении «грязной» мишени увеличивает погрешность измерения концентрации трития. Содержание трития в облученной воде методом сцинтилляционной спектрометрии достаточно достоверно можно оценить только после длительного (около 3 месяцев) хранения.

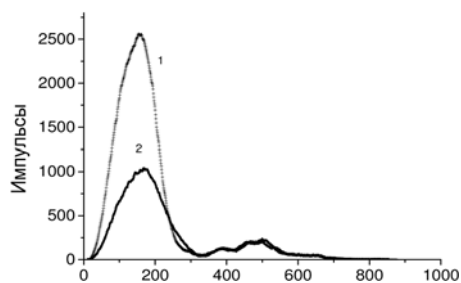


Рисунок 1 – β -спектры радиофармпрепарата $[^{18}\text{F}]\text{NaF}$, измеренные через 2 дня (1) и 3 месяца (2) после синтеза

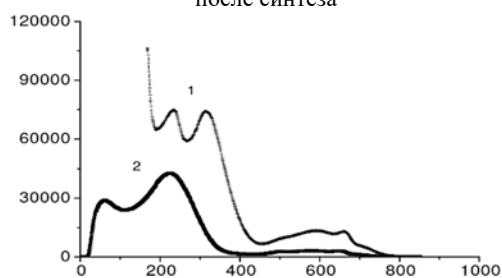


Рисунок 2 – β -спектры регенерированной $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$, измеренные через 2 дня (1) и 3 месяца (2) после синтеза

Отметим, что в готовых радиофармпрепаратах $[^{18}\text{F}]\text{метилхолине}$ и $[^{18}\text{F}]\text{ФДГ}$ содержание трития и других β -излучающих радионуклидов было ниже предела обнаружения использованной методики даже при использовании мишени с накопленной дозой свыше 7000 мкА·ч. Это обусловлено высокой степенью очистки указанных препаратов от нежелательных радионуклидов в процессе синтеза [2–4].

Низкоэнергетичное излучение доминирует в спектрах регенерированной воды (рисунок 2) и мало заметно в спектре РФП $[^{18}\text{F}]\text{NaF}$ (см. рисунок 1). Оно резко снижается после хранения в

течение 3 месяцев (кривые 2 на рисунках 2–4). При хранении также исчезает полоса в области 300 канала. Это указывает на то, что низкоэнергетичное крыло спектра определяется в основном радионуклидами с относительно малым (несколько дней) периодом полураспада. Высокоэнергетичное крыло спектров трансформируется в значительно меньшей степени.

Для анализа полученных экспериментальных данных нами были привлечены ранее полученные экспериментальные данные по исследованию γ -излучающих радионуклидов при облучении мишеней с большой накопленной дозой.

Доминирующими радионуклидами в измеренных на третьи сутки после синтеза образцов регенерированной воды являются изотопы кобальта (^{55}Co , ^{56}Co , ^{57}Co , ^{58}Co), марганца ^{52}Mn и никеля ^{57}Ni , с активностью на момент окончания синтеза фармпрепарата $\sim (5-10) \cdot 10^4$ Бк/мл каждый [4]. Кроме того, наблюдались изотопы рения ^{181}Re , технеция ^{95}Tc , ^{96}Tc , хрома ^{51}Cr и марганца ^{54}Mn с удельной активностью в диапазоне 50–2000 Бк/мл на момент окончания синтеза. Радиоизотопы ^{52}Mn , ^{57}Ni , ^{181}Re , ^{95}Tc , ^{96}Tc являются короткоживущими (период полураспада менее недели) и распадаются путем К-захвата. Вероятнее всего, указанные радионуклиды ответственны за низкоэнергетичную часть β -спектров регенерированной воды. Радионуклиды ^{56}Co , ^{57}Co , ^{58}Co и ^{54}Mn с периодом полураспада $t_{1/2} \geq 70$ сут определяют вид высокоэнергетичной области β -спектров регенерированной воды и РФП $[^{18}\text{F}]\text{NaF}$. Видно, что все они являются β -излучателями: распадаются посредством К-захвата или испускают позитроны (β^+ -распад), реже электроны (β^- -распад).

Таким образом, показано, что методом сцинтилляционной спектроскопии с использованием спектрометра с TDCR регистрацией HIDEX 300 SL и гамма-бета-спектрометра МКС-АТ1315 возможен эффективный контроль содержания β -излучающих радионуклидов, образующихся в процессе производства РФП.

Литература

1. Позитронно-эмиссионная томография. Ч.1: Характеристика метода. Получение радиофармпрепаратов / С.Д. Бринкевич [и др.] // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – 2013. – № 2. – С. 129–137.
2. Долгоживущие радионуклиды при производстве $[^{18}\text{F}]\text{фторхолина}$ для ПЭТ-диагностики / П.В. Тылец [и др.] // Известия НАН Беларуси. Серия химических наук. – 2018. – № 3. – С. 359–368.
3. Долгоживущие радионуклиды в производстве 2- $[^{18}\text{F}]\text{фтордезоксиглюкозы}$ / Д.И. Бринкевич [и др.] // Медицинская физика. – 2018. – № 1. – С. 80–88.
4. Long-lived radionuclides in the production of ^{18}F -labeled radiopharmaceuticals / V.O. Krot [et al.] // 13th Int. Symposium on the Synthesis and Application of Isotopically Labelled Compounds, Prague, Czech Republic, 3–7 June 2018. – Prague, 2018. – P. 43.

УДК 528.029.673, 528.71, 519.237.8

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ СПЕКТРАЛЬНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ХВОЙНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО ДАННЫМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Гуляева С.И., Литвинович Г.С., Силюк О.О., Цикман И.М.

Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ
Минск, Республика Беларусь

Проведение подспутниковых исследований с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является удобным и перспективным инструментом анализа окружающей среды.

Целью работы является разработка методики авиационного эксперимента с участием БПЛА для решения задачи обнаружения патологий хвойных лесных насаждений по данным спектральной аппаратуры, а также проведение классификации полученных данных для выявления усыхающих образцов хвои. В работе представлено описание методики летного эксперимента для получения спектров коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) подстилающей поверхности и первые результаты классификации полученных данных различными методами классификации с оценкой их точности.

В июле 2020 г. выполнялась серия летных экспериментов лесных насаждений вблизи д. Новосады Минской области, в том числе съемки с БПЛА. В качестве полезной нагрузки на вертолет были установлены портативный спектрометр ФСР-04 [1] и смартфон для регистрации фотоизображений. Также выполнялось синхронное надирное измерение белой диффузной пластины спектрометром ССП-600Н [1] на поверхности земли, в 50 метрах от исследуемого лесного массива. Оборудование работало в автоматическом режиме.

Спектрометр ФСР-04 оснащен объективом с регулируемым фокусным расстоянием до 58 мм, поле зрения составляет 1×7 . Как спектрометр ФСР-04, так и ССП-600Н имеют рабочий спектральный диапазон: 400–900 нм и детекторы разрядностью 12 бит, в качестве диспергирующего элемента используются вогнутые голографические дифракционные решетки. Поле зрения ССП-600Н составляло $3 \times 0,5$.

В качестве БПЛА использовался аппарат UVH-25EL – БПЛА вертикального взлета вертолетного типа, выполненный по одновинтовой схеме с рулевым винтом (рисунок 1). Взлетная масса БПЛА составляет порядка 42 кг, включая полезную нагрузку массой до 5 кг. Управление вертолетом осуществлялось с поверхности земли оператором путем задания параметров движения аппарата.

Спектрометром ФСР-04 и смартфоном сделаны более 700 спектров и снимков подстилающих поверхностей изучаемого лесного массива вблизи д. Новосады. При спектрометрировании использовался режим автоэкспозиции, т.к. это

обеспечивало удобство подбора экспозиции спектра без необходимости внешнего вмешательства.



Рисунок 1 – БПЛА UVH-25EL, оснащенный спектрометром ФСР-04, перед вылетом

Особенностью вертолетных измерений является малая скорость движения аппарата, возможность «зависания» над измеряемым объектом и проведения съемки на небольших высотах по сравнению с самолетными измерениями (около 50 м над поверхностью земли для вертолета). Преимущество вертолетных измерений состоит в отсутствии «смаза» спектральных данных и фотоизображений, появляющегося при движении носителя, а также в возможности регистрации избранных объектов без примеси остальных.

Для спектральных данных приборов ФСР-04 и ССП-600Н проводилась процедура коррекции второго порядка дифракции [2]. Спектры также пересчитывались в абсолютные единицы яркости спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ). Дальнейшая обработка включала в себя вычисления коэффициента спектральной яркости объектов подстилающей поверхности по формуле (1):

$$КСЯ(\lambda_i) = \frac{R_{ФСР}(\lambda_i)}{R_{ССП_МС}(\lambda_i)}, \quad (1)$$

где λ_i – длина волны; $R_{ФСР}(\lambda_i)$ – яркость изучаемого объекта, измеренная спектрометром ФСР-04, в единицах СПЭЯ; $R_{ССП_МС}(\lambda_i)$ – яркость молочного стекла, измеренная ССП-600Н, в единицах СПЭЯ. При этом, $R_{ССП_МС}(\lambda_i)$ выбиралась как наиболее близкая по времени регистрации к $R_{ФСР}(\lambda_i)$.

Предварительно, в лабораторных условиях проводились спектральные измерения образцов

хвои различных степеней усыхания. В качестве образцов выступали срезанные иголки. Измерения проводились с помощью специальной установки CHERRY (CHlorophyll Estimation and Reflectance Registration sYstem) для измерения коэффициента спектральной яркости растительных объектов. В качестве спектрометра использовался Solar M150 [3]. Установка CHERRY позволяет осуществлять проведение измерений с целью вычисления КСЯ природных объектов для надирной геометрии визирования как для условий освещения имитатором прямого солнечного излучения, так и при помощи освещения протяженным источником, имитирующим излучение небесной сферы, в спектральном диапазоне 0,4–2,5 мкм для различных зенитных углов солнца в полностью автоматическом режиме.

Для классификации вертолетных данных применялись классификаторы по обучающим выборкам, созданным в лабораторных условиях. Использовались такие общеизвестные методы классификации, как метод линейного дискриминантного анализа и метод Random Forest [4, 5], причем входными данными для классификаторов служили как рассчитанные значения вегетационных индексов для каждого из спектров, так и, собственно, значения спектров КСЯ в зависимости от длины волны. Для каждого спектра были рассчитаны около 50 различных вегетационных индексов [6, 7], чувствительных к содержанию хлорофилла и стрессу растений. Для оценки точности классификаторов использовались данные фотозображений, полученные с БПЛА, то есть визуально определялись степени усыхания деревьев: здоровые (1–2 степень) и под воздействием стресса (3–4 степень). Значение, выданное классификатором для объекта, относилось к одному из двух обобщенных классов. Если этот класс соответствовал классу визуальной классификации, то считалось, что классификатор определил класс объекта верно, в противном случае – неверно.

Наилучшие результаты показал метод линейного дискриминантного анализа с классификацией по вегетационным индексам (70 %). Наихудший результат показали линейный дискриминантный анализ с классификацией по длинам волн (45 %) и метод Random Forest с классификацией по длинам волн (45 %).

Нужно отметить, что в результате проведения лабораторных измерений были получены спектральные данные образцов (срезанных иголок) в определенной конфигурации. При спектрометрировании же с борта БПЛА измерения проводились в отличных от лабораторных условиях. Так, изменилась высота, при которой производилась съемка, и, как следствие, область спектрометрирования также изменилась; расположение иголок на живых образцах отличается от конфигурации срезанных иголок, в поле зрения попадают также ветки при натурном эксперименте, особенно при высоких значениях степени усыхания хвои.

Таким образом, в работе была представлена методика летного эксперимента для получения КСЯ подстилающей поверхности по данным, полученным с БПЛА. Примененная контролируемая классификация по методу линейного дискриминантного анализа с использованием вегетационных индексов позволяет верно определять степень усыхания хвои с вероятностью 70 %.

Литература

1. Катковский Л.В., Беляев Б.И., Сосенко В.А., Аblaмейко С. В. Аппаратно-программный комплекс «Калибровка» для наземного спектрометрирования подстилающей поверхности и атмосферы // Материалы 7-го Белорусского космич. конгресса. Минск. – 2017. – Т. 2. – С. 36–40.
2. Бручковская С.И., Литвинович Г.С., Бручковский И.И., Катковский Л.В. Алгоритм коррекции дифракции второго порядка дифракции в спектрометре с вогнутой дифракционной решеткой // Журнал прикладной спектроскопии – 2019. – Т. 86, № 4. – С. 620–626.
3. Solar Laser Systems. – Режим доступа: <https://solarlaser.com/devices/multi-purpose-compact-monochromator-spectrograph-m150/>. – Дата доступа: 08.07.2020.
4. Hastie T. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. / T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman. – 2nd ed. – Springer-Verlag, 2009. – 746 p.
5. Kuhn M. Applied Predictive Modeling / M. Kuhn, K. Johnson. – Springer, New York, 2013. – 600 p.
6. John Gamon, Josep Penuelas, and Christopher Field (1992). A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of environment*, 41, 35–44.
7. Alphabetical List of Spectral Indices. – Режим доступа: <https://www.harrisgeospatial.com/docs/alphabeticalspectralindices.html>. – Дата доступа: 08.08.2020.

ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОКОМПЕНСАЦИИ КОМПАКТНОГО ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ ТОРЦЕВОГО СЧЕТЧИКА ГЕЙГЕРА

Дубовик Н.А., Левко И.А.

Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Для радиационной защиты человека от воздействия внешнего ионизирующего излучения (ИИ) требуется проведение мониторинга защитных величин: эквивалентной и эффективной доз облучения. Эти величины не измеримы на практике, что приводит к необходимости использования для их оценки так называемых операционных величин [1].

Операционной величиной для индивидуального мониторинга внешнего облучения является индивидуальный эквивалент дозы, $H_p(d)$, равный эквиваленту дозы в образце из мягкой биологической ткани в точке размещения индивидуального дозиметра под слоем экранирующего материала толщиной d . При облучении всего тела человека сильнопроникающим излучением, таким как фотонами с энергиями свыше 12 кэВ, для оценки эффективной дозы измеряется индивидуальный эквивалент дозы при $d = 10$ мм, обозначаемый как $H_p(10)$.

В свою очередь эквивалент дозы равен поглощенной дозе D , умноженной на стандартизованный коэффициент качества излучения k , зависящий от вида и энергии ИИ [1].

Поглощенная доза является основной физической величиной, измеряемой на практике. Усреднение этой величины по конкретным органам и тканям и использование взвешивающих коэффициентов для учета различий в биологической эффективности различных видов ИИ позволяет оценить эффективную дозу.

В индивидуальных дозиметрах для регистрации ионизирующего излучения широко используются газоразрядные детекторы на основе счетчиков Гейгера. Счетчики Гейгера обладают высокой чувствительностью, обеспечивают регистрацию различных типов излучения, генерируют большой выходной сигнал и имеют малые габариты.

При дозиметрии фотонного ИИ с помощью счетчиков Гейгера выполняется измерение как поглощенной дозы, так и мощности поглощенной дозы $\dot{D} = dD/dt$. Мощность поглощенной дозы связана со скоростью счета газоразрядного детектора следующим образом [2]

$$\dot{D} = \mu_m \bar{E} \frac{n_{сч}}{\varepsilon_{сч}}, \quad (1)$$

где μ_m – массовый коэффициент поглощения энергии фотонов в образцовом веществе; \bar{E} – средняя энергия фотонов; $n_{сч}$ – число импульсов,

генерируемых счетчиком за 1 с; $\varepsilon_{сч}$ – эффективность регистрации счетчика. Отсюда можно получить выражение для дозовой или радиационной чувствительности счетчика Гейгера:

$$\frac{n_{сч}}{\dot{D}} = \frac{\varepsilon_{сч}}{\mu_m \bar{E}}. \quad (2)$$

Так как в выражении (2) параметры μ_m и \bar{E} всецело определяются внешними факторами, дозовая чувствительность напрямую связана с эффективностью регистрации счетчика $\varepsilon_{сч}$. В свою очередь последний параметр для счетчиков Гейгера существенно зависит от вида и кинетической энергии излучения. Эта зависимость получила название «ход с жесткостью». Под жесткостью понимается энергия ИИ.

Эффективность счетчика Гейгера, как правило, является отношением числа зарегистрированных частиц к числу всех частиц ИИ, прошедших через его рабочий объем, и выражается в относительных единицах или процентах.

Для дозиметрии фотонного излучения необходимо, чтобы чувствительность детектора не зависела от энергии ИИ. Согласно выражению (2) для счетчиков Гейгера исключить эффект хода с жесткостью не представляется возможным. Однако для детекторов данного типа допустимо использование специальных фильтров, которые позволяют уменьшить ход с жесткостью и добиться приемлемой точности измерения мощности поглощенной дозы в диапазоне энергий фотонов от 12 кэВ до 2 МэВ.

Для построения индивидуальных дозиметров интерес представляет газоразрядный торцевой счетчик Гейгера «Бета-6-1», выпускаемый НПФ «Консенсус» [3], благодаря малым габаритам и возможности регистрации рентгеновского и γ -излучения свыше 15 кэВ. Этот детектор обеспечивает реализацию традиционной технологии дозиметрического контроля облучения низко- и среднеэнергетичными фотонами ИИ.

На графике зависимости эффективности от энергии для детектора «Бета-6-1» (рисунок 1) виден резкий ход с жесткостью. Поэтому для реализации дозиметра на базе данного детектора нужен подбор материалов, окружающих счетчик Гейгера, для компенсации хода с жесткостью. Традиционными материалами, используемыми для данной цели, являются: вольфрам, свинец, железо, олово, алюминий, медь.

Спецификой фильтра для компактного дозиметра является то, что используемые в нем мате-

риалы не должны значительно увеличивать габариты детектора. Исходя из этого, предпочтительным является применение пластин из металлов с большой плотностью, т. к. такие пластины даже при их малой толщине дают значительный эффект ослабления низкоэнергетического фотонного ИИ.

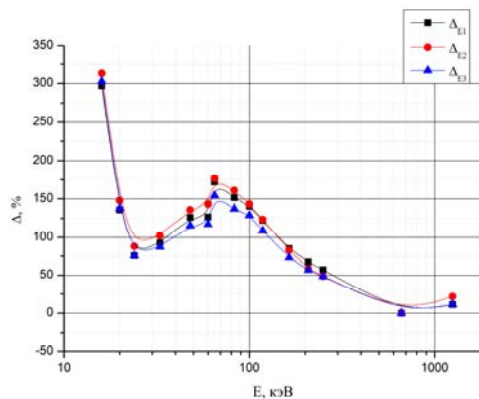


Рисунок 1 – Зависимость эффективностей регистрации от энергии фотонного излучения 3-х детекторов «Бета-6-1», соотнесенные к эффективности для энергии 662 кэВ

При использовании одной пластины в фильтре эффективность регистрации счетчика Гейгера ε_f может быть записана в виде

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{сч} e^{-\rho_1 \mu_{m,1} d_1}, \quad (3)$$

где ρ_1 – плотность металла; $\mu_{m,1}$ – массовый коэффициент ослабления; d_1 – толщина пластины.

Однако при такой конфигурации фильтра после прохождения фотонного ИИ через пластину с высокой плотностью из нее могут излучаться вторичные электроны и характеристическое излучение, попадающие затем на входное окно счетчика Гейгера.

Для устранения данного эффекта целесообразно использовать еще одну пластину металла с меньшей плотностью, которая будет задерживать электроны. Кроме этого дополнительная пластина дает дополнительное нежелательное ослабление исходного потока ИИ для нижней части диапазона энергий меньше 100 кэВ.

Практика показывает, что уменьшить ослабление потока ИИ можно путем частичного перекрытия площади входного окна пластиной из металла с меньшей плотностью. Материалами для второй пластины могут служить железо, алюминий или медь. Если обозначить через s_1 долю от общей площади входного окна детектора, занятого металлом с плотностью ρ_1 , то тогда выражение (3) для эффективности запишется следующим образом:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{сч} e^{-\rho_1 \mu_{m,1} d_1} [1 + s_1 (e^{-\rho_2 \mu_{m,2} d_2} - 1)]. \quad (4)$$

Изменение процентного соотношения для второй пластины все же не дает возможности регистрировать энергии в пределах 16–30 кэВ. Используя предложенный выше подход (4), но оставив некоторые участки фильтра без ослабляющих пластин получим эффективность регистрации как:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{сч} e^{-\rho_1 \mu_{m,1} d_1} [s_2 + s_1 (e^{-\rho_2 \mu_{m,2} d_2} - 1)] + \varepsilon_{сч} (1 - s_2), \quad (5)$$

где s_2 – доля от общей площади входного окна детектора, занимаемой пластиной металла с высокой плотностью.

Наилучший результат компенсации хода с жесткостью с помощью композитного фильтра (5) приведен на рисунке 2.

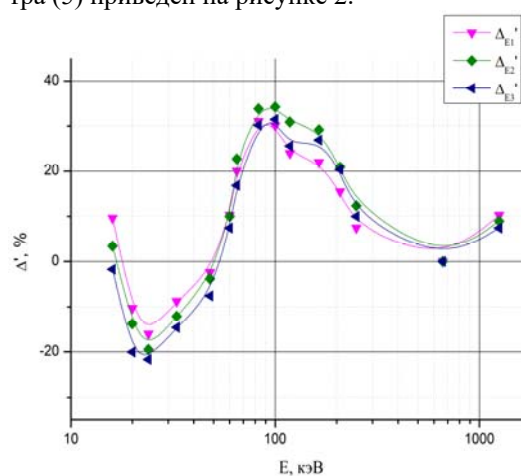


Рисунок 2 – Зависимость эффективностей регистрации от энергии фотонного излучения 3-х детекторов «Бета-6-1» с фильтром, соотнесенные к эффективности для энергии 662 кэВ

При этом достигается неравномерность характеристики эффективности регистрации в пределах $+34\% \div -21\%$ при использовании пластин из вольфрама и алюминия с толщинами 0,5 и 0,25 мм соответственно.

Литература

1. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. /Под общей ред. М.Ф. Киселёва и Н.К.Шандалы. – М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. – 343 с.
2. Машкович В.П., Панченко А.М. Основы радиационной безопасности: Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.
3. Счётчик альфа-бета-гамма излучений БЕТА-6-1. [Электронный ресурс] / Научно-производственная фирма Консенсус. – Режим доступа: <https://consensus-group.ru/katalog/alfa-beta-gamma-counters/36-beta-6-1>. – Дата доступа: 15.12.2019.

УДК 629.3.018.2.089.68(476)

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ ИСПЫТАНИЙ И РЕЗУЛЬТАТОВ ПОВЕРОК СТЕНДОВ ТОРМОЗНЫХ

Железнов А.Ю., Андросенко Р.М.

Белорусский государственный институт метрологии
Минск, Республика Беларусь

Безопасность дорожного движения является основным из приоритетных направлений государственной политики Республики Беларусь. Основным показателем является аварийность транспорта, зависящая от технического состояния различных компонентов или систем транспортного средства, таких как рулевое управление, тормозная система, система зажигания и т.д. Из всего перечисленного около 45 % приходится на неисправность тормозных систем. Все параметры тормозной системы могут определяться средствами технической диагностики тормозов.

Общая конструкция силового тормозного стенда. В настоящее время наибольшее распространение на диагностических станциях и станциях, проводящих гостехосмотр, получили тормозные стенды силового типа, принципиальная схема которых показана на рисунке 1.

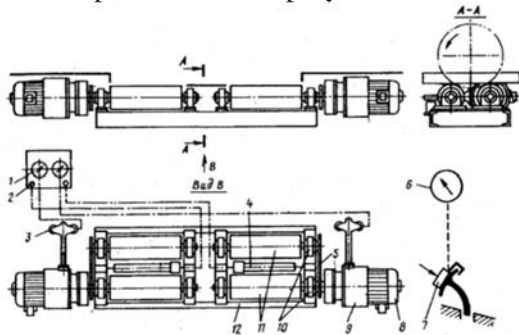


Рисунок 1 – Типовая схема силового тормозного стенда:

1 – измеритель тормозных сил; 2 – световые индикаторы блокировки колес; 3 – датчик тормозной силы; 4 – вспомогательный антиблокировочный ролик; 5 – цепная передача; 6 – измеритель давления на педаль; 7 – датчик давления на педаль автомобиля; 8 – электродвигатель; 9 – редуктор; 10 – подшипник; 11 – ролики; 12 – рама

Современные силовые тормозные стенды могут оценивать:
по общим параметрам транспортного средства и состоянию тормозной системы следующие параметры:

- сопротивление вращению незаторможенных колес; неравномерность тормозной силы за один оборот колеса; массу, приходящуюся на колесо; массу, приходящуюся на ось;

- по рабочей и стояночной тормозным системам:

- наибольшую тормозную силу; время срабатывания тормозной системы; коэффициент неравномерности (относительную неравномер-

ность) тормозных сил колес оси; удельную тормозную силу; усилие на органе управления.

Данные контроля выводятся на дисплей в виде цифровой или графической информации (рисунков 2). Результаты диагностирования могут выводиться на печать и храниться в памяти компьютера в базе данных диагностируемых автомобилей. Результаты проверки тормозных систем могут выводиться также на приборную стойку. Динамику процесса торможения можно наблюдать в графической интерпретации (рисунок 3). График показывает тормозные силы (по вертикали) относительно усилия на педали тормоза (по горизонтали). На нем отражены зависимости тормозных сил от усилия нажатия на педаль тормоза как для левого колеса (верхняя кривая), так и для правого (нижняя кривая).



Рисунок 2 – Данные контроля тормозной системы автомобиля:

ПО – рабочий тормоз передней оси; СТ – стояночная тормозная система; ZO – рабочий тормоз задней оси

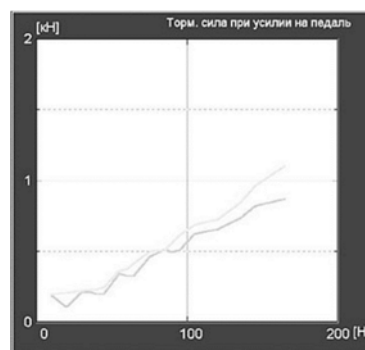


Рисунок 3 – Графическое отображение динамики процесса

Основными компонентами стенда являются два взаимно-независимых комплекта роликов, размещенных в опорно-воспринимающем устройстве (рисунок 4), соответственно для левой и правой сторон автомобиля, силовой шкаф, стойка,

пульт дистанционного управления и силоизмерительное устройство давления на тормозную педаль. Автотранспортное средство устанавливается на испытательный стенд так, чтобы колеса проверяемой оси располагались на роликах. Опорно-воспринимающее устройство предназначено для размещения опорных роликов и принудительного вращения колес диагностируемой оси автомобиля, а также для формирования (с помощью датчиков тормозной силы и веса) электрических сигналов, пропорциональных соответственно тормозной силе и части веса автомобиля, приходящегося на каждое колесо диагностируемой оси. Раму опорно-воспринимающего устройства укладывают на резиновые подкладки, чтобы погасить вибрацию. Поверхности роликов силовых стендов делают рифлеными со стальной наваркой, обеспечивающей постоянный коэффициент сцепления по мере износа роликов, или же покрывают базальтом, бетоном и другими материалами, обеспечивающими хорошее сцепление шин. Для лучшего сцепления роликов с шинами колес оба ролика делают ведущими, а расстояние между ними – таким, чтобы обеспечить невозможность съезда автомобиля со стенда при торможении. Выезд автомобиля со стенда после проверки тормозов ведущей оси обеспечивается реактивным моментом мотор-редукторов или подъемниками, расположенными между роликами. Для этой цели один из роликов (со стороны выезда) снабжают устройством, допускающим вращение только в одну сторону.

Из-за тяжелых условий эксплуатации (большой поток техники, загрязнение, не своевременное техническое обслуживание), происходит преждевременный выход из строя датчиков силы и веса, что приводит к приостановлению функционирования стенда, до замены или ремонта датчиков. Так же при эксплуатации по мере износа опорных роликов ухудшаются их эксплуатационные качества, уменьшается диаметр и межосевое расстояние, приводящее к проскальзыванию колес автомобиля, занижению показаний тормозного усилия. Эти выводы основаны на анализе проверок тормозных стендов, проведенных ла-

бораторией НИЦИСИиТ в течении 5 лет ($350 \pm 10\%$ в год). При выполнении поверки, государственный поверитель «предупреждает» о критическом либо предкритическом состоянии элементов тормозного стенда (регулировка датчиков, замене роликов). В случае с тормозными роликами, поверитель измеряет максимальный износ роликов (с помощью щупов или измеряет диаметр роликов), а в случае с измерительными датчиками, поверитель нагружает стенд в пределах всего диапазона измерения (с помощью калиброванного датчика силы и специального приспособления), после чего высчитывает погрешность результатов измерений. Владелец стенда принимает решение о замене или регулировке этих компонентов дилерами с последующей внеочередной поверкой.

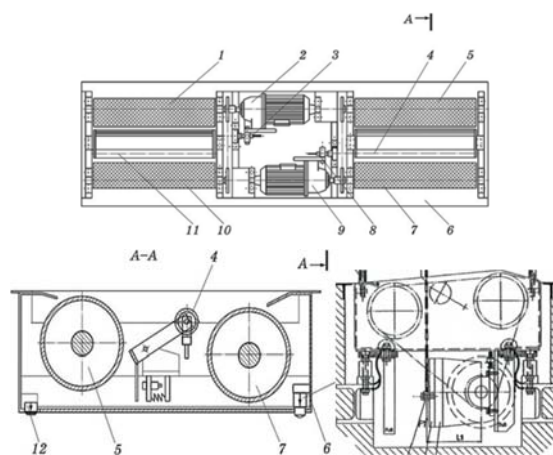


Рисунок 4 – Опорно-воспринимающее устройство:
1, 5, 7, 10 – ролики; 2, 9 – мотор-редукторы;
3, 8 – тензометрические датчики; 4, 11 – следящие ролики; 6 – рама; 12 – датчики веса

Литература

1. СТБ 1641-2016 «Транспорт дорожный. Требования к техническому состоянию по условиям безопасности движения. Методы поверки».
2. Диагностирование автомобилей. Практикум: учеб. пособие / Под ред. А. Н. Карташевича. – Минск: Новое знание. – М.: ИНФРА-М, 2011. – 208 с.

УДК 535.231.11

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЭТАЛОН ЕДИНИЦ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Длугунович В.А., Дунец Д.О., Исаевич А.В., Круплевич Е.А., Насенник Л.Н.

Институт физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

В настоящее время рынок лазерной и оптоэлектронной техники стремительно растет и имеет широкий круг областей применения, включающих медицину, промышленность, энергетику, био- и наноиндустрию, авиакосмические

технологии, агропромышленное производство, национальную безопасность. Для его развития необходимо современное метрологическое обеспечение лазерной и оптоэлектронной техники, базирующееся на современной эталонной базе,

основой которого является точность воспроизведения, хранения и передачи соответствующим средствам измерений (СИ) размеров единиц и в первую очередь основных энергетических величин: мощности и энергии лазерного излучения (ЛИ).

В 2019 г. в рамках подпрограммы «Эталоны Беларуси» ГНТП «Эталоны и научные приборы» создан Национальный эталон единиц средней мощности и энергии лазерного излучения (ЭСМЭЛИ), предназначенный для воспроизведения и хранения в спектральном диапазоне от 0,3 до 10,6 мкм единицы средней мощности ЛИ в динамическом диапазоне от 10^{-9} до 2 Вт и единицы энергии ЛИ в диапазоне от 10^{-7} до 1 Дж, а также передачи единицы средней мощности ЛИ на длинах волн 0,532; 0,808; 1,064 и 10,6 мкм и единицы энергии ЛИ на длинах волн 0,532; 0,808; 1,064 мкм эталонам низшего звена, калибровочным (поверочным) установкам и рабочим СИ энергетических характеристик ЛИ, применяемым для калибровки, диагностики и измерений характеристик источников и приемников оптического излучения. Постановлением Госстандарта эталон внесен в Государственный реестр национальных и исходных эталонов Республики Беларусь за № НЭ РБ 56-19.

Функционально эталон состоит из следующих основных систем: комплекса средств измерений средней мощности и энергии лазерного излучения, основой которого являются эталонный измерительный преобразователь калориметрического типа ПИ-15 (ЭИП), снабженный обмоткой замещения для подачи в нее мощности электрического тока, и трап-детектор модели LTD-11 эталонного класса; комплекса аппаратуры передачи размера единиц средней мощности и энергии ЛИ поверяемым (калибруемым) эталонам и рабочим СИ энергетических характеристик ЛИ, включающего четыре стабилизированных непрерывных лазера со средней мощностью излучения до 10 Вт, оптическую систему транспортировки излучения и модули формирования импульсного излучения; блока управления, сбора и обработки измерительной информации и оптического стола, необходимого для размещения указанных систем эталона [1].

В ЭСМЭЛИ применена структурная схема с использованием «последовательного» способа воспроизведения единицы средней мощности ЛИ и передачи ее размера, который предполагает измерения значений мощности ЛИ с помощью ЭИП либо трап-детектора при измерениях мощности низкоуровневого ЛИ и последующей установки на их место калибруемого СИ. При этом с помощью приемника-«свидетеля», на который отводится часть излучения лазера, фиксируется возможное относительное изменение мощности источника ЛИ в процессе передачи размера еди-

ницы. «Последовательный» способ обеспечивает высокие метрологические характеристики воспроизведения единицы средней мощности ЛИ и передачи ее размера, а также позволяет использовать в составе эталона менее мощные лазеры. Кроме того, использование приемника-«свидетеля» позволяет сэкономить рабочий ресурс калориметра и устанавливает менее жесткие требования к характеристикам источников ЛИ и, прежде всего, к стабильности мощности ЛИ [2].

Специальная конструкция приемного элемента ЭИП позволила минимизировать неконтролируемые тепловые потери в окружающую среду, обусловленные теплопроводностью, конвекцией и излучением, и достичь высокой эквивалентности мощности поглощенного оптического излучения и мощности постоянного электрического тока замещения. Время формирования выходного сигнала не превышает 5 минут. Необходимая точность измерений мощности оптического излучения достигается путем замещения последней мощностью электрического тока, которая при калибровке ЭИП измеряется с высокой точностью.

При подаче постоянного электрического тока на обмотку замещения ЭИП происходит преобразование мощности электрического тока, выделяемой в его электрическом нагревателе, в тепловой поток, в результате чего в термобатарее ЭИП образуется аналоговый выходной электрический сигнал, пропорциональный средней мощности теплового потока. Этот сигнал измеряют с помощью нановольтметра и определяют текущее значение коэффициента преобразования средней мощности электрического тока. Полученное в результате проведенных исследований среднее значение коэффициента преобразования средней мощности электрического тока K_{Σ} составляет $5,10 \pm 0,01$ мВ/Вт.

После проведения калибровки ЭИП по постоянному электрическому току, в него подают оптическое излучение. В приемном элементе преобразователя излучение поглощается и преобразуется в тепловой поток, средняя мощность которого пропорциональна средней мощности излучения. В результате этого, как и при воздействии электрического тока, термобатарея ЭИП реагирует на тепловое воздействие и обеспечивает появление электрического сигнала, пропорционального средней мощности оптического излучения. Это позволяет проводить с помощью эталона воспроизведение единицы средней мощности оптического излучения.

При работе эталона в режиме передачи единицы средней мощности ЛИ излучение одного из лазерных источников блока излучателей с помощью поворотных зеркал, выставляемых в нужное положение блоком автоматизированных платформ, сначала направляется на ЭИП либо на трап-детектор, а затем на калибруемое СИ, кото-

рое устанавливаются на место эталонного измерителя. Часть излучения от светоделительной пластинки подается на приемник-«свидетель», который используется для оценки уровня мощности и контроля стабильности мощности ЛИ, поступающего на приемники излучения при их последовательной замене. Сигналы с ЭИП, трап-детектора и приемника-«свидетеля» подаются на нановольтметр и далее на блок измерений и управления эталоном, выполняющий обработку сигналов и осуществляющий управление работой эталона с помощью персонального компьютера.

При воспроизведении и передаче единицы энергии ЛИ в измерительный канал с помощью блока автоматизированных платформ вводится один из оптико-механических затворов (ОМЗ). Каждый ОМЗ предназначен для работы на определенной длине волны излучения (0,532; 0,808; 1,064 мкм), соответствующей длине волны излучения лазеров. ОМЗ формируют импульсы ЛИ длительностью от 10 мкс до 10 с, частота следования которых может варьироваться от 0 до 100 кГц. Характеристики импульсов излучения контролируются в отдельном канале с помощью оптоэлектрического преобразователя FPS-1, на который светоделительной пластинкой направляется часть излучения. Длительность и частота следования импульсов с преобразователя FPS-1 измеряются с помощью частотомера.

Основные точностные метрологические характеристики ЭСМЭЛИ в спектральном диапазоне от 0,3 до 10,6 мкм: расширенная неопределенность ($k = 2$, $P = 95\%$) размера единицы средней мощности ЛИ, воспроизводимой эталоном, не более 0,04 % в диапазоне от $5 \cdot 10^{-3}$ до 2 Вт; не более 0,15 % в диапазоне от 10^{-9} до $5 \cdot 10^{-3}$ Вт; размера единицы энергии ЛИ, воспроизводимой эталоном, не более 0,29 %. Эталон обеспечивает передачу единицы средней мощности ЛИ на фиксированных длинах волн с расширенной неопределенностью не превышающей 0,24 % и единицы энергии ЛИ – не превышающей 0,10 %.

Эталон соответствует требованиям введенного в Республике Беларусь межгосударственного стандарта ГОСТ 8.275-2016 [3].

Области применения ЭСМЭЛИ: передача размера единиц средней мощности и энергии ЛИ эталонам более низкого ранга и высокоточным средствам измерений, применяемым в медицине, промышленности, науке, образовании и т.д., посредством их поверки и калибровки; проведение исследований метрологических характеристик разрабатываемой аппаратуры в области приборостроения, медицины, науки и техники.

Созданный эталон единиц средней мощности и энергии ЛИ по своим характеристикам соответствует эталонам наиболее крупных метрологических центров и является конкурентоспособным с зарубежными аналогами. По некоторым параметрам, таким как динамический диапазон воспроизведения единицы средней мощности ЛИ, стандартная неопределенность воспроизведения единицы средней мощности ЛИ, динамический диапазон воспроизведения единицы энергии ЛИ, стандартная неопределенность воспроизведения единицы энергии ЛИ он превосходит эталоны отдельных международных центров.

Литература

1. Национальный эталон единиц средней мощности и энергии лазерного излучения // В.А. Длугунович [и др.] / Метрология–2019: Тезисы докладов Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–28 марта 2019 г. / Под общ. ред. канд. техн. наук Гуревича В.Л. – Мн.: БелГИМ, 2019. – С. 40–44.
2. Эталонная база Системы обеспечения единства измерений лазерной и светодиодной техники Республики Беларусь // В.А. Длугунович [и др.] / Полупроводниковые лазеры и системы на их основе: 12-й Белорусско-Российский семинар, 27–31 мая 2019, Минск. – Мн.: Ковчег, 2019. – С. 43–46.
3. ГОСТ 8.275-2016 Государственная поверочная схема для средств измерений средней мощности лазерного излучения и энергии импульсного лазерного излучения в диапазоне длин волн от 0,3 до 12,0 мкм. – Введ. 2018 – 09 – 01. – Мн.: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2018. – 12 с.

УДК 303.222

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОПЕРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ПРЕДЕЛЬНЫМИ КАЛИБРАМИ

Соломахо В.Л.¹, Цитович Б.В.², Михейчик А.В.¹

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный институт повышения квалификации по стандартизации,
метрологии и управлению качеством
Минск, Республика Беларусь

Важным вопросом каждого производства является обеспечение качества выпускаемой продукции. Любое нарушение требований к качеству продукции ведет к увеличению издержек производства и, как следствие, удорожанию самой про-

дукции. Поэтому с целью обеспечения заданного уровня качества продукции необходимо своевременно идентифицировать нарушения требований к качеству, которые выявляются с помощью технического контроля, проводимого на всех стадиях

производства и направленного на своевременное выявление и изъятия брака из производственного потока, т.е. проведение разбраковки.

Для измерительного контроля параметров, ограниченных двумя предельными значениями, разработаны и применяются метрологические модели, в которых генеральной совокупности контролируемых параметров приписывают некое случайное распределение (могут приниматься разные виды распределений с различными параметрами) [1]. В соответствии с принятой моделью деталь признается годной, если она входит в диапазон:

$$LLS \leq X \leq ULS, \quad (1)$$

где ULS , LLS – предельные значения контролируемого параметра.

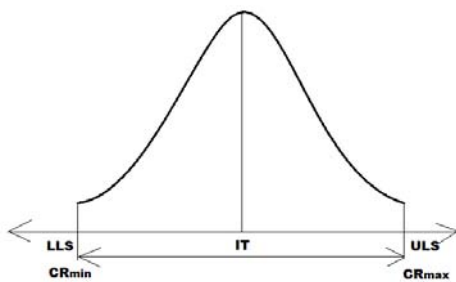


Рисунок 1 – Модель контроля продукции при нормальном законе распределения контролируемого параметра:

IT – допуск контролируемого параметра;
 LLS , ULS – предельные значения контролируемого параметра; CR_{min} , CR_{max} – границы регулирования

Модель предполагает, что в результатах разбраковки не будет ошибок контроля (неправильно принятых и неправильно забракованных деталей).

При измерительном контроле эта модель не реализуема из-за погрешностей процесса измерений $\Delta_{\Sigma i}$. С учётом распределения случайной погрешности измерения соответствующая метрологическая модель представлена на рисунке 2.

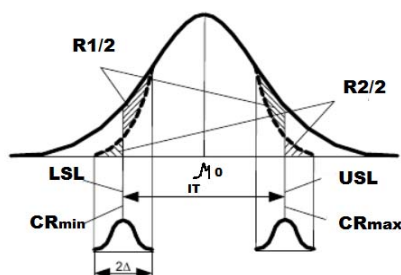


Рисунок 2 – Модель контроля продукции с учетом погрешности средств измерений:

IT – допуск контролируемого параметра;
 μ_0 – математическое ожидание контролируемого параметра; USU , LSL – предельные значения контролируемого параметра; $R1/2$ и $R2/2$ – риски первого и второго рода; Δ – погрешность измерения;
 CR_{min} , CR_{max} – приемочные границы

Погрешность измерения кроме инструментальной составляющей включает погрешности метода, условий и субъективную составляющие. Решение о годности контролируемого параметра принимается, в соответствии со следующим неравенством:

$$LSL \leq X^* \leq ULS, \quad (2)$$

где оценка контролируемого параметра X_i^* :

$$X_i^* = X_i + \Delta_{\Sigma i} \quad (3)$$

Данная модель достаточно хорошо исследована, для неё определены риски ошибок первого (ложный дефект) и второго (необнаруженный дефект) рода и выданы рекомендации по количественному оцениванию результатов контроля [2, 3].

В серийном и массовом производстве наиболее удобными и широко распространенными являются такие атрибутивные средствами измерительного контроля как калибры. Преимуществом использования методики контроля с предельными калибрами является упрощение контроля, повышение объективности результатов, отсутствие необходимости привлекать для его реализации высококвалифицированных исполнителей. Видимые преимущества такого подхода привели к практическому отсутствию исследований, связанных с его применением.

Простейший калибр с позиций метрологии представляет собой однозначную (или многозначную) меру. Главная отличительная особенность меры – отсутствие преобразований сигнала измерительной информации самим средством измерений. Сложность контроля калибрами состоит в оценивании погрешности контроля, которая обусловлена близостью значения контролируемой величины к границам поля допуска и возможными погрешностями контроля из-за ограниченной точности калибра. Для корректного отражения процесса разбраковки детали необходимо иметь информацию о поле практического рассеяния партии деталей и точности действительного размера калибра. Такая информация при проектировании процедуры контроля калибрами, как правило, недоступна. Поэтому приходится оперировать нормативными данными, такими как допуск контролируемого параметра и допуск на размер калибра.

В научно-технической литературе и нормативных документах, например [4], предлагается рассматривать модель измерительного контроля атрибутивными средствами (в том числе калибрами), опираясь на равномерное распределением погрешностей (рисунок 3).

Данная модель построена с использованием ряда допущений, правомочность которых необходимо оценить.

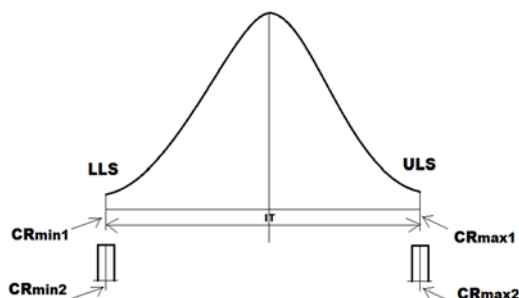


Рисунок 3 – Модель контроля продукции с использованием атрибутивных средств контроля: IT – допуск контролируемого параметра; LLS , ULS – предельные значения контролируемого параметра; CR_{min1} , CR_{max1} – приемочные границы

В соответствии с представленной моделью погрешность измерения сводится к погрешности средства контроля, которая, в свою очередь, обусловлена допуском на изготовление калибра. Такой подход можно рассматривать как частный случай при условии, что остальные составляющие погрешности измерений равны нулю.

Действительно, погрешность метода измерений можно считать пренебрежимо малой в связи с реализацией принципов проектирования рабочих поверхностей калибров («принципы Тейлора»), предполагающих «увязку» конструкции рабочих поверхностей калибров с контролируемыми границами размеров («пределом максимума материала» и «пределом минимума материала»). Рабочие поверхности проходных калибров проектируют как аналог сопрягаемой поверхности для комплексного контроля её элементов («принцип подобия»), поскольку прохождение такого калибра через контролируемый размерный элемент гарантирует собираемость с ответной деталью.

Приравнивание субъективной составляющей погрешности измерений к нулю справедливо в случае, если при оценке годности проходной калибр проходит, а непроходной не проходит через контролируемый элемент детали исключи-

тельно под действием силы тяжести калибра. Такая методика легко реализуема при контроле наружных размерных элементов деталей, а при контроле внутренних размерных элементов методика работает, если сила тяжести калибра направлена вертикально. Во всех остальных случаях появляется риск проявления субъективной составляющей погрешности измерений, величину которой необходимо оценивать при проектировании методики выполнения измерений.

Проанализировав информацию, касающуюся атрибутивных средств контроля целесообразно сформулировать следующие задачи, решение которых позволит получить более объективную картину контроля и снизить риски принятия ошибочных решений при контроле размеров деталей предельными калибрами:

1. Разработать методику подтверждения достоверности процесса контроля геометрических параметров при использовании атрибутивных средств.
2. Предложить критерии оценки правильности распределения погрешности измерения.
3. Выявить факторы, влияющие на изменения рисков первого и второго рода при контроле геометрических параметров с применением атрибутивных средств и определить пути их минимизация.

Литература

1. Чупырин В.Н. Технический контроль в машиностроении. // Справочник проектировщика. М., 1987. – 437 с.
2. Соломахо Д.В. Использование метрологического моделирования процессов операционного контроля для нормирования погрешности измерений / Д.В. Соломахо, С.С. Соколовский, Б.В. Цитович // Метрология и приборостроение. – 2010. – № 3. – С. 32–36.
3. ГОСТ 8.051-83 ГСОЕИ «Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм»
4. СТБ 2450-2016 «Системы менеджмента. Менеджмент измерений. Анализ измерительных систем».

УДК 67.05:53.08

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ: АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ

Нефедов С.Н.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

При разработке новых образцов продукции испытания является заключительным и одним из важнейших этапов. По их результатам устанавливают – выполнены ли требования технического задания на разработку. При этом обычно сталкиваются интересы заказчика/ инвестора (если продукция разрабатывается не за счет внутренних средств) и исполнителя – разработчика (из-

готовителя) продукции. Заказчик заинтересован в строгом выполнении всех заданных требований, а для исполнителя – отрицательные результаты испытаний (даже по отдельным пунктам) ведут к дополнительным затратам на устранение выявленных недостатков, и даже, в крайнем случае, отказ заказчика принять результаты работы. Поэтому проведение испытаний должно регла-

ментироваться законодательно установленными правилами обязательными для обеих сторон, которые должны регламентировать все аспекты испытаний, в том числе решение вопросов в конфликтных ситуациях.

На законодательном уровне вопросы испытаний частично регламентируются Законом Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений», а испытания с целью подтверждения соответствия – Законом «Об оценке соответствия техническим требованиям и аккредитации органов по оценке соответствия». Более детально конкретные технические и организационные вопросы должны регламентироваться техническими нормативными правовыми актами (ТНПА).

В настоящее время основополагающий стандарт СТБ 972 [1], регламентирующий вопросы разработки и постановки продукции на производство, отменен. Действуют только стандарты на алкогольную продукцию [2] и продукцию легкой промышленности [3].

К сожалению, в Республике Беларусь нет единого и завершеного комплекса стандартов системы испытаний, аналогичного комплексу ТНПА системы обеспечения единства измерений – ТКП 8.ХХ и СТБ 80ХХ. В СССР – это стандарты серии ГОСТ 8.ХХ, некоторые из которых действуют и в настоящее время, как межгосударственные стандарты.

В СССР в начале 80-х годов была начата разработка комплекса стандартов Системы государственных испытаний продукции. Были разработаны и приняты некоторые стандарты, в частности терминологический стандарт ГОСТ 16504-81 [4] и стандарт по аттестации испытательного оборудования ГОСТ 24555-81 [5], а также некоторые другие. Однако большая часть нормативных документов была принята в виде методических указаний и имела статус руководящих документов по стандартизации – РД [6]. Во второй половине 80-х годов по инициативе Госстандарта СССР данные работы были продолжены в рамках Международной организации законодательной метрологии (МОЗМ). Разработка документов МОЗМ была практически завершена, однако, в связи с распадом СССР, работа советских специалистов в рабочей группе МОЗМ прекратилась, а так как они были основными исполнителями, то эти документы МОЗМ не были приняты и не опубликованы.

В Российской Федерации на основе, разработанных в СССР РД [6], было разработано и принято несколько стандартов по вопросам испытаний. Прежде всего следует отметить ГОСТ Р 51672-2000 [7], ГОСТ Р 8.568-97 [8], военные стандарты по испытаниям вооружения и ряд других. Большинство из этих стандартов включено в комплекс стандартов ГСИ (8-й комплекс). Однако некоторые стандарты оказываются вне этого

комплекса (например, [4]), кроме того остаются вопросы, которые не урегулированы стандартами (например, требования к методикам испытаний).

В Республике Беларусь работы по разработке новых ТНПА системы испытаний практически не велись. Так стандарт по аттестации испытательного оборудования был принят только в 2016 году [9]. Госстандарт Беларуси проводит политику гармонизации национальных ТНПА с международными стандартами, однако при реализации такого подхода встречаются определенные проблемы, которые обусловлены некоторыми различиями в подходах и терминологии. Кроме того, в международных стандартах не регламентированы некоторые важные вопросы.

Среди документов международных организаций ИСО и МЭК (стандарты ISO/IEC серии 17 000 и руководства) нет специального документа регламентирующего требования к методикам измерений или испытаний. В версии стандарта ISO/IEC 17025:2005 и аутентичном государственном стандарте Республики Беларусь [10] требования к структуре методики испытаний были приведены в подпункте 5.4.4, однако в новой редакции стандарта ISO/IEC 17025:2017 и соответствующем межгосударственном стандарте ГОСТ ISO/IEC 17025:2019 таких требований нет.

Требования к методикам выполнения измерений (МВИ) установлены ГОСТ 8.010-2013 [11]. В стандарте установлен порядок разработки, аттестации, метрологического надзора за аттестованными МВИ, а также требования по стандартизации, в том числе построению МВИ. В приложении к стандарту приведены достаточно подробные рекомендации по содержанию разделов МВИ.

Испытание является более широким понятием. При проведении испытаний могут проводиться измерения, аналитические исследования, диагностирование, оценка органолептическими методами, регистрация определенных событий (отказов, повреждений) и т. д. Общие требования к программе и методике испытаний приведены в стандарте на текстовые документы ЕСКД [11].

Однако, требования, приведенные в данном стандарте очень краткие, поэтому обычно для методик испытаний используют ГОСТ 8.010. Однако не во всех случаях это возможно (определяется спецификой испытания).

В ISO/IEC 17025 установлено требование, что перед применением должна проводиться валидация методик испытаний. В ГОСТ 8.010-2013 установлена обязательность аттестации МВИ. В Законе Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений» (редакция 2006 года) установлено, что МВИ перед применением должны пройти процедуру метрологического подтверждения пригодности, порядок проведения которой регламентируется ТКП 8.006-2011 [13]. Термины метрологическое подтверждение пригод-

ности по ТКП 8.006, аттестация по ГОСТ 8.010 и валидация по ISO/IEC 17025 эквиваленты. В новой редакции Закона «Об обеспечении единства измерений» вводится термин аттестация МВИ.

Несмотря на обязательность, порядок аттестации или валидации методик испытаний в действующих ТНПА не установлен.

Имеется еще ряд вопросов метрологического обеспечения испытаний, которые необходимо регламентировать соответствующими ТНПА, основные из них следующие:

– необходимо разработать основополагающий ТНПА общего применения (или систему ТНПА) Системы разработки и постановки продукции на производство, в том числе регламентирующих проведение испытаний, в части введения обязательной метрологической экспертизы программы и уточнения требований к структуре и содержанию методик испытаний;

– разработать ТНПА и соответствующие рекомендации по оценке неопределенности (погрешности) результатов и ее учета при принятии решений по результатам испытаний;

– разработать/переработать ТНПА, регламентирующие метрологическое обеспечение испытаний, метрологической аттестации (валидации) методики испытаний, испытательного оборудования и испытательных комплексов.

Литература

1. СТБ 972-2000 Разработка и постановка продукции на производство. Общие положения.

2. СТБ 1790-2016. Разработка и постановка алкогольной продукции на производство. Основные положения.

3. СТБ 2239-2011. Разработка и постановка продукции легкой промышленности на производство. Общие положения.

4. ГОСТ 16504-81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.

5. ГОСТ 24555-81. Система государственных испытаний продукции. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения.

6. Система государственных испытаний продукции. Сборник нормативно-технических документов. М.: Издательство стандартов, 1983. – 168 с.

7. ГОСТ Р 51672-2000. Метрологическое обеспечение испытаний продукции для целей подтверждения соответствия.

8. ГОСТ Р 8.568-97. Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения.

9. СТБ 8015-2016. Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Испытательное оборудование. Общие требования к аттестации.

10. СТБ ИСО/МЭК 17025-2007. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.

11. ГОСТ 8.010-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений (МВИ). Основные положения.

12. ГОСТ 2.106-96. Единая система конструкторской документации. Текстовые документы.

13. ТКП 8.006-2011. Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Метрологическое подтверждение пригодности методик выполнения измерений. Правила проведения работ.

УДК 620.178.1.089.68(476)

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ НАЦИОНАЛЬНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦ ТВЕРДОСТИ Обозный Е.А.

*Белорусский государственный институт метрологии
Минск, Республика Беларусь*

Существовавшая до недавнего времени система, при которой единица твердости от ведущих национальных метрологических институтов (НМИ) попадала в Республику Беларусь посредством эталонных мер твердости, показала себя как дорогостоящая и зависящая от качества воспроизведения единиц другими НМИ. Дороговизна обусловлена как стоимостью самих мер твердости, так и стоимостью их поверки/калибровки. Это обуславливало возможность метрологического контроля лишь наиболее востребованных шкал твердости.

Для расширения метрологического обеспечения шкал твердости, используемых в республике, в период с 2017 по 2020 годы БелГИМ создал и исследовал национальный эталон единиц твердости НЭ РБ 57-20. Эталон воспроизводит единицы твердости для шкал Роквелла, Супер-Роквелла,

Бринелля и Виккерса за счет создания точных испытательных нагрузок, прикладываемых к изготовленным с высокой точностью инденторам различных форм и размеров с последующим измерением параметров индентирования.

Эталон предназначен для воспроизведения, хранения и передачи размера единиц твердости с целью обеспечения единства измерений в Республике Беларусь, а также для калибровки и поверки эталонных мер твердости 1-го разряда в соответствии с ГОСТ 8.063-2012 «Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений твердости металлов и сплавов по шкале Виккерса», ГОСТ 8.064-94 «Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений твердости по шкалам Роквел-

ла и Супер-Роквелла», ГОСТ 8.062-85 «Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений твердости по шкалам Бринелля».

В таблицах 1–4 приведены шкалы твердости и их метрологическая обеспеченность до начала создания эталона и в настоящее время.

Таблица 1 – Шкалы твердости Бринелля

Шкала твердости	Метрологическая обеспеченность до начала создания национального эталона единиц твердости	Метрологическая обеспеченность в настоящее время
HBW 10/3000	Меры твердости 1-го разряда + твердомер-компаратор	Эталонная установка для воспроизведения единиц твердости
HBW 10/1500	–	
HBW 10/1000	Меры твердости 1-го разряда + твердомер-компаратор	
HBW 10/500	–	
HBW 10/250	–	
HBW 10/100	–	
HBW 5/750	–	
HBW 5/250	–	
HBW 5/125	–	
HBW 5/62,5	–	
HBW 5/25	–	Эталонная установка для воспроизведения единиц твердости
HBW 2,5/187,5	Меры твердости 2-го разряда	
HBW 2,5/62,5	Меры твердости 2-го разряда	
HBW 2,5/31,25	–	
HBW 2.S/15.625	Меры твердости 2-го разряда	
HBW 2,5/6,25	–	
HBW 1/30	–	
HBW 1/10	–	
HBW 1/5	–	

Таблица 2 – Шкалы Роквелла

Обозначение шкалы	Метрологическая обеспеченность до начала создания национального эталона единиц твердости	Метрологическая обеспеченность в настоящее время
HRA	Меры твердости 1-го разряда + твердомер-компаратор	Эталонная установка для воспроизведения единиц твердости
HRBW		
HRC		
HRD	–	
HREW	–	
HRFW	–	
HRGW	–	
HRHW	–	
HRKW	–	

Таблица 3 – Шкалы Супер-Роквелла

Обозначение шкалы	Метрологическая обеспеченность до начала создания национального эталона единиц твердости	Метрологическая обеспеченность в настоящее время
HR15N	Меры твердости 1-го разряда + твердомер-компаратор	Эталонная установка для воспроизведения единиц твердости
HR30N		
HR45N		
HR15TW		
HR30TW		
HR45TW		

Таблица 4 – Шкалы твердости Виккерса

Шкала твердости		Метрологическая обеспеченность до начала создания национального эталона единиц твердости	Метрологическая обеспеченность в настоящее время
Микротвердость	HV 0,01	–	Эталонная установка для воспроизведения единиц твердости
	HV 0,025	Эталонные меры твердости	Эталонная установка для воспроизведения единиц твердости
Твердость по Виккерсу с малой нагрузкой	HV 0,05	–	
	HV 0,2	Эталонные меры твердости	
	HV 0,3	–	
	HV 0,5	Эталонные меры твердости	
	HV 1	Эталонные меры твердости	
	HV 2	–	
	HV 3	–	
	Твердость по Виккерсу	HV 5	
HV 10		Меры твердости 1-го разряда + твердомер-компаратор	
HV 20		–	
HV 30		Меры твердости 1-го разряда + твердомер-компаратор	
HV 50		–	
HV 100		Меры твердости 1-го разряда + твердомер-компаратор	

Создание национального эталона было разделено на три этапа. На первом этапе создана установка, воспроизводящая единицу твердости по шкалам Виккерса с нагрузками 0,09807 Н; 0,025 Н; 0,4903 Н; 1,961 Н; 2,942 Н; 4,903 Н; 9,807 Н; 19,61 Н. На втором этапе – создана установка, воспроизводящая единицу твердости для шкал Роквелла, Супер-Роквелла, Виккерса и Бринелля с нагрузками 29,42 Н; 49,03 Н; 61,29 Н;

98,07 Н; 153,2 Н; 196,1 Н; 245,2 Н; 294,2 Н; 306,5 Н; 490,3 Н; 612,9 Н; 980,7 Н; 1226 Н; 1839 Н.

На третьем этапе создана установка, воспроизводящая единицу твердости для больших нагрузок: 2452 Н; 4903 Н; 7355 Н; 9807 Н; 14710 Н; 29420 Н. Вместе с установкой появилась возможность измерять параметры инденторов и отпечатков для шкал Бринелля и Виккерса.

Проведенные исследования показали соответствие установок требованиям, предъявляемым к ним стандартами ISO 6506, ISO 6507 и ISO 6508 при воспроизведении нагрузок и измерении параметров индентирования.

Проверка установок из состава эталона проводится прямым и косвенным методом. Прямой метод предусматривает контроль характеристик установок, инденторов и систем линейных измерений отпечатков. Использование косвенного метода с применением эталонных мер твердости используется для контроля общей работоспособности установок.

Полученные с использованием калиброванных Физико-техническим институтом Германии

эталонных мер твердости значения неопределенностей воспроизведения единиц твердости сопоставимы со значениями, заявленными в базе данных СМС-строк.

Результаты измерений при прямых и косвенных проверках позволяют судить о соответствии эталона предъявляемым к нему требованиям. В последующем метрологические характеристики эталона будут подтверждаться при проведении международных ключевых сличений.

Создание национального эталона позволяет самостоятельно воспроизводить единицы твердости без необходимости обращения в НМИ других стран и существенно снизило затраты предприятий страны на поверку/калибровку за счет возможности проведения метрологического контроля в БелГИМ. Как показал полугодовой опыт эксплуатации – эталон стабильно воспроизводит единицы твердости. Для предприятий страны наиболее востребованными стали услуги по метрологическому контролю мер микротвердости и мер для шкал Бринелля 2,5/187,5 и 2,5/62,5. Кроме того, БелГИМ осуществляет калибровку инденторов для других НМИ.

УДК 656.13

ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ОЦЕНКИ ДОРОЖНЫХ УСЛОВИЙ И СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Почужевский О.Д.¹, Кристочук М.Е.², Радкевич М.В.³

*¹Криворожский национальный университет
Кривой Рог, Украина*

*²Национальный университет водного хозяйства и природоиспользования
Ровно, Украина*

*³Ташкентский институт инженеров ирригации механизации сельского хозяйства
Ташкент, Республика Узбекистан*

Как известно, одним из основных факторов, которые характеризуют дорожно-транспортную обстановку перевозки грузов, характеризуют дорожные условия, которые характеризуются прежде всего изменением продольных уклонов и коэффициента сопротивления качению дорожного покрытия на протяжении маршрута движения. Иными словами характеризуются распределением коэффициента суммарного сопротивления дороги на протяжении всей длины маршрута движения.

Общеизвестные показатели, такие как коэффициент суммарного сопротивления дороги, управляющий и средневзвешенный уклон, безусловно, позволяют охарактеризовать тот или иной маршрут движения, однако дают общее понятие о сложности трассы и не учитывают динамику изменения и распределение участков с разным сопротивлением качению по длине маршрута $\psi(L)$.

Согласно современным требованиям к уровню общей иерархии диспетчерских авторизиро-

ванных систем управления транспортом (АСУТ), характерно доведение управляемости транспортного хозяйственного комплекса до уровня транспортной единицы как ключевого и исполнительного элемента АСУТ, поскольку именно здесь начинается формирование потока данных, которые в дальнейшем будут использоваться для реализации всех управляющих функций АСУТ.

Применение спутниковых технологий навигации и связи в транспортной отрасли для решения поставленной задачи приобретает особо важное значение.

Анализ программного обеспечения спутниковых навигационных систем, показал не совсем корректное распределение выбранного маршрута: самый быстрый, самый короткий и т.д. Это связано с тем, что для транспортной компании одним из наиболее важных параметров, является именно суммарные затраты на транспортировку грузов в которые входит затраты на топливо, которые в свою очередь зависят от сложности

дорожно-транспортных условий – изменения продольных уклонов и коэффициента сопротивления качению дорожного покрытия на протяжении всего маршрута движения.

Таким образом существует два фактора, которые должен учесть показатель сложности маршрута движения, для того чтобы адекватно и комплексно охарактеризовать весь маршрут:

- интенсивность;
- величину изменения коэффициента суммарного сопротивления дороги в течение маршрута движения.

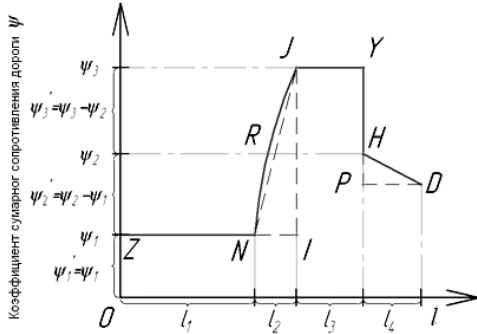


Рисунок 1 – Закономерность изменения коэффициента суммарного сопротивления дороги по длине маршрута

Общая длина маршрута эквивалентна вытянутой кривой ZD, которая определяется суммой всех ее участков. Определение полной длины кривой выполняется следующим образом:

– общая сумма участков кривой $D_{cr.\psi(l)}$, изменяющих свою длину параллельно оси абсцисс (отрезки ZN, JY), определяется из выражения:

$$D_{cr.\psi(l)OXY} = \sum_{y=1}^h l_y \quad (1)$$

где l_y – длина участков кривой, изменяющих свою длину параллельно оси абсцисс на y -м участке маршрута; h – общее количество участков маршрута движения, на которых $\psi(l)$ меняет свое значение параллельно оси абсцисс; h – общая сумма участков кривой, изменяющих свою длину параллельно оси y (отрезок YH), определяется выражением:

$$D_{cr.\psi(l)OXY} = \sum_{u=1}^r (|\psi_z - \psi_{z-1}|)_u = \sum_{u=1}^r (\psi_z)_u \quad (2)$$

где $(\psi_z)_u$ – длина кривой, значение которой изменяется параллельно оси y на u -м участках маршрута между значением коэффициента общего сопротивления дороги (ψ) в точке z и $z-1$, а фактическое значение изменения ψ выражается как ψ_z' ; r – общее количество участков маршрута, на которых $\psi(l)$ меняет свое значение параллельно оси u .

Если же изменение длины кривой $D_{kr.\psi(l)}$ в определенной области происходит одновременно на абсциссе и оси ординат (сегмент HD), или на

любой изогнутой форме (сегмент NJ) – ее длина определяется путем аппроксимации отдельных участков маршрута прямоугольными треугольниками, длина гипотенузы которых будет отражать длину полинома:

$$D_{kr.\psi(l)OXY} = \sum_{\vartheta=1}^m \sqrt{l_{\vartheta}^2 + \psi_{\vartheta}^2}, \quad (3)$$

где m – общее количество участков маршрута, на которых $\psi(l)$ меняет свое значение любой изогнутой формы; ϑ – участок маршрута движения, на котором длина кривой $D_{кр.\psi(l)}$ определяется аппроксимацией треугольниками.

Количество треугольников будет зависеть от принятой допустимой погрешности, которая не должна превышать 2–3 %, т. е. должно проводиться сравнение с точностью расчетов натуральных показателей. Ошибка в этом случае связана с количеством точек, разделяющих прямые участки (NJ), которые аппроксимируют сложные кривые маршрута (NRJ). Количество точек должно быть достаточным, чтобы ошибка аппроксимации не превышала практически допустимого значения.

При приближении круга правильным n -угольником, сравнивая их площади, относительная погрешность будет:

$$\mu = 1 - \frac{n_x \sin(\frac{2\pi}{n_x})}{2\pi}, \quad (4)$$

где n_x – количество сторон многоугольника.

Предполагая, что для того, чтобы погрешность аппроксимации была сопоставима с точностью расчета натуральных показателей, существует предельное количество участков деления круга, равное 17 (при $\mu = 0,02$). Следовательно, количество участков дугового деления как части окружности будет пропорционально его центральному углу:

$$N_a = (17 \cdot \phi) / (2 \cdot \pi) \quad (5)$$

где ϕ – величина центрального угла дуги, град.

Используя это выражение, можно оценить адекватность аппроксимации его графического прототипа:

$$\Delta'' = NRJ - NJ \quad (6)$$

Относительная погрешность определяется из выражения:

$$\delta_i = \frac{\Delta''}{NJ} \cdot 100 \% \quad (7)$$

Интенсивность полиномиального изменения будет зависеть от величины изменения во время маршрута L . Это значение предлагается определить как средневзвешенное значение общего сопротивления дороги на маршруте $\psi_{\text{пд.сд}}$:

$$\psi_{\text{пд.сд}} = \psi_{a^*} \cdot \frac{L_{a^*}}{L_c} + \psi_{a^*+1} \cdot \frac{L_{a^*+1}}{L_c} + \dots + \psi_{p^*+1} \cdot \frac{L_{p^*+1}}{L_c} \quad (8)$$

где a'' – определенный участок маршрута, на котором изменяется либо длина, либо коэффициент общего сопротивления дороги; δ'' – общее количество участков маршрута движения, на которых изменяется длина или коэффициент общего сопротивления дороги. L_c – общая длина маршрута, м.

Следовательно, полная длина кривой $D_{кр. \psi(l)}$ определяется из выражения:

$$D_{ед. \psi(l)} = D_{ед. \psi(l) OX} + D_{ед. \psi(l) OY} + D_{ед. \psi(l) OXY} \quad (9)$$

Используя произведение длины кривой $D_{кр. \psi(l)}$ на значение коэффициента общего сопротивления дороги ($\psi_{ср. зв.}$), определяется сложность дорожно-транспортных условий с учетом частоты, амплитуды и распределения $\psi(l)$ по маршруту, выраженное в относительных единицах, имеет вид:

$$K = D_{ед. \psi(l)} \cdot \psi_{пд. сд.} \quad (10)$$

Средневзвешенное значение коэффициента общего сопротивления дороги ($\psi_{ср. зв.}$) определяется по известному выражению, позволяющему установить фактическое значение ψ по длине маршрута.

Использование показателя сложности дорожно-транспортных условий (K) при определении специфики изменения транспортных перевозок позволяет учесть пределы изменения, веса и распределения участков с различным сопротивлением качению по всему маршруту.

УДК 681.2.083

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ-СИГНАЛИЗАТОР ДЛЯ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

Лукаш В.С.¹, Соломахо В.Л.¹, Лукаш С.М.²

¹Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

²ООО «Полимастер»

Минск, Республика Беларусь

Широкое распространение технологий, использующих атомную энергию и ионизирующее излучение (далее – ИИ), потенциальные риски, связанные с вероятностью аварий на ядерных объектах (число которых в мире увеличивается), а также необходимость утилизации радиоактивных отходов привели к созданию специального (как правило, стационарного) оборудования и автоматизированных систем радиационного контроля [1–4]. В последние годы наряду с рисками объективного характера, связанными с использованием атомной энергии и ИИ, возрастают проблемы ядерного терроризма, незаконного оборота радиоактивных материалов и т.д., которые определяют необходимость создания портативного и мобильного оборудования радиационного контроля.

Определенной характеристикой актуальности работ, проводимых в этом направлении, является патентная активность и количество нормативных

Совершенно очевидно, что активно внедряемые программно-аппаратные комплексы мониторинга транспортных средств, функционирующие на базе навигационных модулей GPS и каналов сетей сотовой связи, представляют собой техническую основу такой системы. Итогом ее реализации должна стать единая сеть информационно-аналитического и модельного обеспечения процессов принятия решений в сфере транспорта и смежных областях, которые будут учитывать не только длину, скоростной режим, загруженность маршрута движения но и специфику распределения коэффициента суммарного сопротивления дороги на протяжении всей длины маршрута движения, в частности спуски, подъемы, качество дорожного покрытия (наличие дефектов дорожного покрытия) последнее должно вноситься в программное обеспечение на уровне внесения в реальное время затворов, пробок и т.д. должны корректироваться с учетом.

Литература

1. Почужевський О.Д. Формування показників складності маршруту руху та узгодженості параметрів системи «двигун-трансмсія» кар'єрного автосамоскиду / О.Д. Почужевський. Вісник національного університету водного господарства та природокористування: зб. наук. пр. – Рівне, 2011. – Вип. 3(55). – С. 109–115.

документов (далее – НД), разработанных странами, определяющими тенденции развития атомной энергетики и оборудования (в том числе контрольного) для их реализации (рисунки 1, 2).

При ежедневном пользовании портативным и мобильным оборудованием радиационного контроля важны массогабаритные параметры, энергопотребление, а также возможность работы в различных погодных условиях.

В нашей стране одним из производителей оборудования радиационного контроля, в том числе и портативного, является ООО «Полимастер». Выпускаемый предприятием ИСП-PM1703GNA-II предназначен для поиска (обнаружения и локализации) радиоактивных и ядерных материалов по их внешнему гамма- и нейтронному излучениям, измерения мощности индивидуального эквивалента дозы (далее – МЭД) гамма-излучения [5].

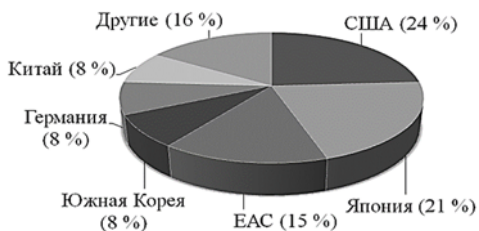


Рисунок 1 – Патентная активность стран-производителей оборудования

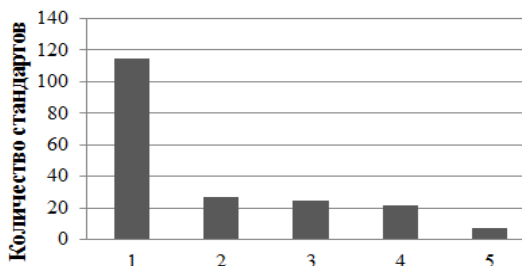


Рисунок 2 – Количество НД:

1 – Международные стандарты; 2 – Национальные стандарты США; 3 – Межгосударственные стандарты; 4 – Европейские стандарты; 5 – Национальные стандарты Республики Беларусь

Данный Измеритель-сигнализатор поисковый (далее – ИСП) имеет следующую структурную схему представленную на рисунке 3.

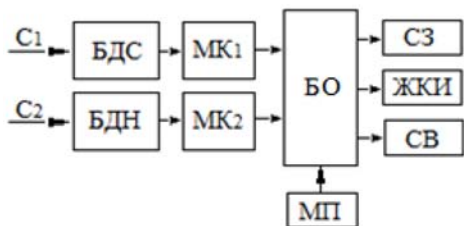


Рисунок 3 – Структурная схема PM1703GNA-II:

С – сигнал; БДН – блок детектирования нейтронный; БДС – блок детектирования сцинтилляционный; МК – микропроцессорный контроллер; БО – блок обработки; СВ - сигнализатор вибрационный СЗ – сигнализатор звуковой; МП – модуль питания

Прибор оснащен двумя высокочувствительными детекторами: сцинтилляционным детектором CsI(Tl) и нейтронным детектором на основе ⁶LiF/⁶ZnS. Также в его состав входят два микропроцессорных контроллера, блок обработки, модуль питания, два сигнализатора и жидкокристаллический индикатор (далее – ЖКИ).

Блок детектирования преобразует регистрируемые гамма кванты или нейтроны в электрические импульсы квазигансовской формы, которые затем поступают в блок обработки.

Блок обработки осуществляет тестирование прибора, управляет всеми режимами работы, ведет математическую обработку сигналов и осуществляет вывод информации на ЖКИ, световой, звуковой и вибрационный сигнализаторы. Выдача информации на сигнализаторы

осуществляется при превышении заранее установленного порогового значения.

В режиме поиска приборы осуществляют сравнение числа импульсов в единицу времени, поступающих с выходов блоков детектирования гамма- и нейтронного излучения, с пороговыми значениями, рассчитанными на основе значений радиационного фона, измеренного при калибровке прибора в естественных условиях с учетом установленных коэффициентов. При обнаружении источника выдается сигнал тревоги и осуществляется категоризация по природе радионуклида (природный или промышленный) [6].

Принцип действия приборов в режиме измерения основан на подсчете числа импульсов, поступающих с выхода детектора гамма-излучений, и вычислении МЭД при измерении гамма-излучения.

В этом режиме на ЖКИ индицируется измеренное значение МЭД в $\mu\text{Sv/h}$, mSv/h , Sv/h (или в $\mu\text{R/h}$, mR/h , R/h). В нижней строке индицируется скорость счета нейтронного канала, s^{-1} .

Сигнализатор выполнен в малогабаритном корпусе из ударопрочной пластмассы, защищенном от попадания воды и пыли. Внешний вид прибора представлен на рисунке 4, а расположение детекторов прибора и их эффективных центров показаны на рисунке 5.



Рисунок 4 – Внешний вид PM1703GNA-II

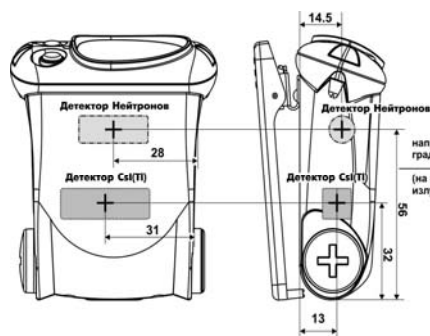


Рисунок 5 – Схема расположения детекторов PM1703GNA-II

Измерители-сигнализаторы поисковые простые и удобны в эксплуатации, имеют малый вес и компактный размер, которые сочетаются с большим сроком службы от одного комплекта элементов питания (до 1000 часов непрерывной работы). Ударопрочный и влагоустойчивый корпус позволяет использовать прибор как в помещениях, так и на открытом воздухе.

Максимальная эффективность обнаружения ИИ наблюдается при расположении ИСП к обследуемому объекту на расстоянии не более 10 см при скорости его перемещения (трассирования) вдоль объекта не более 10 см/с. По мере приближения к ИИ частота следования сигналов возрастает.

Литература

1. Уроки аварий на промышленных облучательных установках / Международное агентство по атомной энергии. – Вена, 1997.
2. Wheatley J., Ortiz-Lopez P. IAEA Radiation Events Database (RADEV), Radiological Protection of Patients in

Diagnostic and Interventional Radiology / J. Wheatley, P. Ortiz-Lopez // Nuclear Medicine and Radiotherapy: Proc. Int. Conf. Malaga, 2001 / IAEA-CN-85-268. – Vienna, 2001.

3. Lessons Learned from Accidents in Industrial Radiography: Safety Reports Series No. 7 / International Atomic Energy Agency. – Vienna, 1998.

4. Lessons Learned from Accidental Exposures in Radiotherapy: Safety Reports Series No. 17 / International Atomic Energy Agency. – Vienna, 2000.

5. ТУ BY 100345122.091-2017 «Измерители-сигнализаторы поисковые ИСП-PM1703GNA-II».

6. Mobile Intel® Pentium® Processor–M. Datasheet / Intel Corporation.

UDC 535.3

UNCERTAINTY ESTIMATING OF THE COMPLEX VALUES IN ELECTROMAGNETIC MEASUREMENTS

Saukova Y.N., Malashonak S.V.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Electromagnetic quantities, for example, electric voltage, current, power, resistance, magnetic flux etc are of interest from the point of view of the concept of uncertainty, since most of them are complex in alternating current circuits containing capacitance or inductance.

Models of mathematical expectations of these quantities have three forms of notation – rectangular, polar and exponential. The rectangular form is [3]:

$$Z=a+bi, \tag{1}$$

where z -complex number; a – real part; b – imaginary part; i – imaginary unit, $i^2=-1$.

The polar form of notation involves the transition from Cartesian coordinates (x,y) to polar ones (r,φ) where r is the distance of the point from the origin and φ is the angle, in radians, from the positive x -axis to the ray connecting the origin of the point [3]:

$$Z = r(\cos\varphi+i\sin\varphi), \tag{2}$$

where r – modulus of complex number:

$$r = |z| = |a + bi| = \sqrt{a^2 + b^2}, \tag{3}$$

φ – argument of complex number,

$$\varphi = \arctg \frac{b}{a}. \tag{4}$$

The exponential form of a complex quantity is [3]:

$$Z = r \cdot e^{i\varphi}, \tag{5}$$

where $e^{i\varphi}$ – complex number from Euler’s formula.

The graphical interpretation of mathematical expectations of a complex quantity is a vector on a plane, as shown in Figure 1 (the real part of the number is plotted along the abscissa – the active

component of the quantity, along the ordinate – the imaginary part (or reactive component)

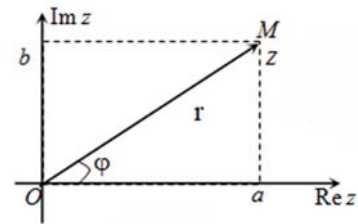


Figure 1 – Graphical representation of a complex quantity

Nowadays, there are guidelines [1–3] for estimating the uncertainty of complex quantities, given in rectangular form. For example, the author of [2] work offers several approaches to describing the uncertainty of a complex quantity: 1) using the Jacobi matrix; 2) based on alternative expressions of the law of propagation of uncertainty: a) through the correlation coefficients, б) using submatrix.

The Jacobi matrix has a block structure that can be related to the derivatives of f with respect to the individual 2D inputs [2].

$$J(y)=[J_1(y) J_2(y) \dots J_m(y)], \tag{6}$$

where

$$J_i(y) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial f_1}{\partial x_{2j}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial f_2}{\partial x_{2j}} \end{bmatrix}. \tag{7}$$

These blocks represent 2D sensitivity coefficients. They can be related to complex partial derivatives of the function using "simple and elegant matrix". For a complex number (1), the mathematical expectation model is as follows [2]:

$$M(z) \equiv \begin{bmatrix} a & -b \\ b & a \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Such matrices behave like complex numbers in the usual matrix operations for arithmetic: division corresponds to multiplication by the inverse matrix and taking a transposition matrix corresponds to a complex conjugation operation. In addition, if the complex function $f(z)$ is analytic in the region of interest, then the Cauchy-Riemann relations will be applied to its partial derivatives [4]:

$$\frac{\partial f_1}{\partial a} = \frac{\partial f_2}{\partial b}, \quad \frac{\partial f_1}{\partial b} = -\frac{\partial f_2}{\partial a}. \quad (9)$$

Equations (8) and (9) show that the complete Jacobi Matrix can be written in the form [2]:

$$J(y) = \left[M \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \right) M \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \right) \dots M \left(\frac{\partial f}{\partial x_m} \right) \right]. \quad (10)$$

An alternative expression of the law of propagation of uncertainty using the correlation coefficients assumes that the covariance matrix is symmetric and positive definite. It can always be considered in the matrix of correlation coefficients and matrix of standard deviations [2]:

$$V(X) = S(X)R(X)S(X)', \quad (11)$$

where $R(X)$ is a matrix of correlation coefficients; $S(X)$ is the diagonal matrix of standard uncertainties of the individual input signal of the component (i.e. the square root of the diagonal elements of $V(X)$).

The propagation law can be expressed in terms of $R(X)$ by substituting (11) in (6) [2, 3]:

$$U(y) = J(y)S(X). \quad (12)$$

This gives an alternative form of the law

$$V(y) = U(y)R(X)U(y)' \quad (13)$$

An alternative submatrix approach uses formulas (6) and (13) to sum by explicitly recognizing (2x2) the internal structure of the matrices $U(y)$, $V(X)$, and $R(X)$. There are m sub-matrices associated with the input quantities in $U(y)$ [2]:

$$U_j(y) = \begin{bmatrix} u_{11j} & u_{12j} \\ u_{21j} & u_{22j} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

In this case, the uncertainty is the product of a two-dimensional matrix of sensitivity coefficients $J_i(y)$ and a submatrix of standard uncertainties from the diagonal matrix $S(X)$ corresponding to input j :

$$U_j(y) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial f_1}{\partial x_{2j}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial f_2}{\partial x_{2j}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(x_{1j}) & 0 \\ 0 & u(x_{2j}) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Thus, $U_j(y)$ is a two-dimensional analogue of the “scalar uncertainty component”.

The “chain rule” of uncertainty estimation, set forth in [2, 3], is based on chains of intermediate calculations considering the correlation between

their results. In addition, authors assume, firstly, the rectangular form of notation of complex quantities should be replaced with an exponential one, since this form of notation allows us to directly work with both degrees of freedom that any complex quantity has. It is convenient to represent these degrees of freedom as uncertainty when measuring the vector length of a complex quantity and the angle of inclination of this vector, through which this value is set in the exponential form of the record. After all, it is these values that we obtain when measuring complex quantities, for example, electromagnetic quantities in alternating current circuit. Thus, the region of permissible values of the measured quantity will be obtained as a region in the Cartesian coordinate system (the dimensions of which are determined by the permissible error or target uncertainty for each degree of freedom) and the measured value itself can be represented as a set of vectors starting at the origin and forming the region values, which should be included in the range of permissible values of this quantity. Secondly, in some cases, it is necessary to consider different laws of probability distribution for the real and imaginary parts of a complex quantity, which can cause difficulties in assessing the range of permissible values of the quantity and verification of compliance of measurement results with requirements.

Third, if, when considering a scalar quantity, we could unambiguously set the tolerance interval on the value axis and then simply compare the measured values with it, assessing whether it falls within the tolerance field. For vector quantities, this is extremely difficult, since we do not have the means to unambiguously compare vectors with each other.

When trying to evaluate and simulate the results of measurements of a complex quantity, we are faced with the need to construct the range of values of the desired quantity based on two degrees of freedom with different distribution laws for each of them. For example, the distribution of the angle of inclination will have the form of the Rayleigh distribution (Figure 2, a) and the modulus of the vector of most physical quantities will have the form of the Gaussian distribution (Figure 2, b).

It may be difficult to combine the uncertainties of the Gauss and Rayleigh probability distributions during the estimating of uncertainty. The range of acceptable values can be represented as a rectangle or ellipse, as shown in the figure 3 [3]. In addition, questions arise about the possible choice of priority between degrees of freedom and requirements for them. The areas of acceptable values for a continuous value are shown in the figure. Obviously, for discrete quantities, they will be described by finite sets of the geometric location of points using the mathematical apparatus of discrete geometry and set theory.

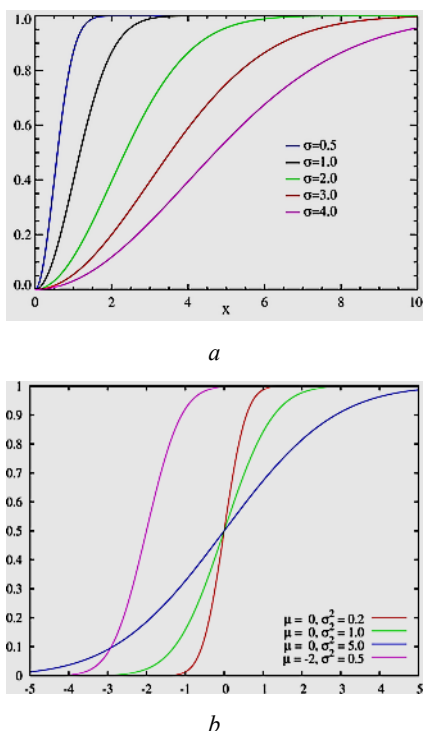


Figure 2 – Probability distribution functions of a complex quantity: *a* – Rayleigh; *b* – Gauss

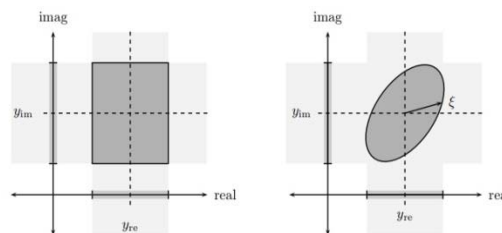


Figure 3 – Representation of the range of acceptable values:
a – with all possible outcomes, *b* – without the least likely

References

1. Dailys Arronde Pérez, Hubert Zangl, «Introducing uncertainty of complex valued quantities in measurement science education», Proc. SPIE 11144, Photonics and Education in Measurement Science 2019, 1114410 (17 September 2019). DOI: 10.1117/12.2531840.
2. Hall B.D. A computational technique for evaluating and propagating the uncertainty of complex valued quantities, Proceedings of 60th ARFTG Washington DC, USA, Dec. 5–6, 2002, 19–28.
3. Parsonson (1971). Pure Mathematics, Vol. 2, Cambridge University Press, June 2nd, 1971, ISBN13: 9780521080323.
4. Spiegel M. R., Complex variables, Schaum's Outline Series, McGraw-Hill, Great Britian, 1974.

УДК 004.056

**АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
 В ПИЩЕВОЙ ОТРАСЛИ**
 Попов А.В., Серенков П.С.

*Белорусский национальный технический университет,
 Минск, Республика Беларусь*

Постоянно изменяющиеся отраслевые технические нормативные правовые акты в сфере систем менеджмента безопасности пищевых продуктов свидетельствуют о повышении заинтересованности в управлении информацией на всех стадиях жизненного цикла продукции.

В настоящее время системы менеджмента информационной безопасности рассматриваются, как одна из важнейших составляющих процесса обеспечения безопасности пищевых продуктов. Стабильный, адекватный, надежный процесс прослеживаемости информации о качестве и безопасности пищевой продукции на всех этапах жизненного цикла продукции не возможен, если не обеспечены надлежащие условия получения, передачи и хранения этой информации. По тем же причинам невозможно обеспечить быстрый обмен информации о возможных проблемах с безопасностью продукции по звеньям жизненного цикла продукции, что, например, важно в случаях обнаружения несоответствия продукции и необходимости быстрого принятия мер по изъятию (отзыву) продукции с рынка.

В настоящее время в пищевой отрасли наблюдается динамическое развитие автоматизированных производств, компьютеризированных технологий. Налицо так называемая цифровизация пищевой отрасли. Повышение степени автоматизации на всех стадиях производства и контроля качества продукции, только повышает риски потерь информации со всеми возможными последствиями. Проблема, идентифицированная в докладе, связана с тем, что используемые технологии поддержания определенной практики документирования стали не применимы для управления электронными данными. Многие предприятия продолжают вести бумажный документооборот, получая и храня данные на бумаге даже там, где есть возможность полного использования электронной информации.

Невзирая на то, что потребность в более новых методах управления информацией (а в особенности, в управлении электронными данными) в промышленности есть, требования к целостности и доступности информации прописаны, как обязательные, при этом в отрас-

левых технических нормативных правовых актах и в нормативных правовых актах отсутствуют достаточные пояснения и описания, как эти обязательные требования к управлению данными выполнять. Требования сформулированы настолько обще, что специалисты пищевой отрасли, ранее не имевшие опыта в управлении информационной безопасностью, просто не имеют должных знаний и квалификации для разрешения данного вопроса.

В самых распространенных стандартах по управлению безопасностью пищевых продуктов, таких как стандарты серии ISO 22 000, руководства Codex Alimentarius, дополнительные руководства международного схемы сертификации FSSC 22 000 и др., содержится не более, чем 1–2 абзаца про управление информационной безопасностью.

В данной ситуации было бы целесообразно воспользоваться опытом управления системами менеджмента информационной безопасностью, но и данный вариант оказывается затруднительным по причине избыточности требований и отсутствия специфических норм, которые применимы только в пищевой отрасли.

Тема менеджмента рисков не нова, достаточно глубоко проработана, и в отдельных сферах деятельности сформирована как отдельное научное направление. Например, в страховом бизнесе риск-менеджмент породил целое научное направление «актуарную математику», в разработке сложных ответственных технических систем – логико-вероятностный метод анализа рисков отказов и т. п.

Серия стандартов по управлению системами менеджмента информационной безопасностью ISO/IEC 27000 условно относится к стандартам «высокоуровневой структуры» и теоретически может быть интегрирована в единую систему менеджмента с ISO 22000. В докладе обосновано, что данная серия стандартов, которая прекрасно показала себя в таких сферах деятельности, как информационные технологии, банковское дело и иные сферы услуг, оказывается в чистом виде практически не применима на предприятиях пищевой отрасли для целей производства и контроля качества.

Анализируя литературные источники мы акцентировали внимание на таких аспектах, как :

- менеджмент рисков в системах менеджмента;
- организационно-методические основы менеджмента рисков;
- подходы, техники, приемы.

С учетом поставленных целей (формирования методологии информационной безопасности на предприятиях пищевой отрасли) в качестве базового аналога была принята серия стандартов ISO/IEC 27000, в которой, по крайней мере, кон-

цептуально сформулирован риск-ориентированный подход в рамках специфической системы управления – системы менеджмента информационной безопасности. Основные положения серии стандартов ISO/IEC 27 000 были адаптированы нами для сети процессов типового предприятия пищевой отрасли.

Сложившаяся ситуация показывает потребность пищевой отрасли в рекомендациях по адаптации существующих требований по обеспечению информационной безопасности для нужд предприятий пищевой отрасли, для использования, как составляющей систем менеджмента безопасности пищевых продуктов. Необходимые рекомендации должны содержать все необходимые методы по обеспечению целостности и доступности данных и, в то же время, не должны включать нормы, которые отрасли на сегодняшний день не нужны и которые будут только усложнять операционную деятельность. Разработанные рекомендации должны максимально охватывать все процессы предприятий на всем жизненном цикле пищевой продукции: от производителя сырья и до дистрибьютора готового продукта в торговые сети. Рекомендации должны охватывать, как непосредственные процессы жизненного цикла продукции (хранение, производство, транспортирование), так и обслуживающие процессы (контроль и обеспечение качества, техническое обслуживание оборудования).

Отрасль на сегодняшний день не заинтересована в обеспечении такой важной составляющей информационной безопасности, как конфиденциальность информации. По этой причине целесообразно разрабатывать рекомендации по системам менеджмента информационной безопасности, опуская меры контроля направленные на управление конфиденциальностью.

Важно, чтобы разработанные рекомендации имели именно системную основу, которую можно интегрировать с единую систему менеджмента, например, таких высокоуровневых стандартов, как СТБ ISO 22 000 и СТБ ISO 9 001.

Для разработки необходимых рекомендаций необходимо выполнить следующие задачи:

1. Проанализировать в национальных отраслевых технических нормативных правовых актах и актах законодательства, а также в актах Евразийского экономического союза, имеющиеся требования по обеспечению информационной безопасности на предприятиях пищевой отрасли.

2. Проанализировать международные отраслевые акты на наличие и способы обеспечения информационной безопасности в отрасли. Особое внимание уделить документам международной организации Глобальной инициативе по безопасности пищевых продуктов (GFSI), а также документам ISO и FAO/WHO.

3. Проанализировать установившуюся практику по целостности данных в пищевой отрасли в Соединенных Штатах Америки, как страны с уникальными подходами к стандартизации и технического нормирования. Изучить имеющиеся подходы к обеспечению информационной безопасности у Управления по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и фармацевтических препаратов (FDA).

4. Изучить распространенные подходы к общим системам менеджмента информационной безопасности. Особое внимание уделить новым стандартам серии ISO/IEC 27 000. Провести анализ найденных требований на применимость и необходимость для внедрения в пищевой отрасли.

5. Провести исследование процессов жизненного цикла продукции и сопутствующих ему процессов. Провести инвентаризацию самых распространенных активов на стадиях хранения, производства, транспортирования, контроля и обеспечения качества. Провести анализ рисков относительно данных активов.

6. Адаптировать полученные меры контроля рисков информационной безопасности, тем самым разработать перечень подходов к управлению информацией в рамках системы менеджмента безопасности пищевых продуктов.

7. Сформировать и разработать системный подход к управлению рисками для информационной безопасности на предприятиях пищевой

отрасли таким образом, чтобы полученный подход мог быть интегрирован в имеющуюся систему менеджмента по стандарту с высокоуровневой структурой.

Предлагаемая концепция информационной безопасности предприятий пищевой отрасли на основе риск-ориентированного подхода основана на комплексном процессном подходе.

Полученные по итогу исследовательской работы научно-методические рекомендации могут быть в дальнейшем внедрены в национальную систему технического нормирования и стандартизации либо внедрены на предприятиях иным образом.

Данные рекомендации должны будут удовлетворять потребность в управлении информационной безопасностью данных, как находящихся в бумажном, так и в электронном виде. Но, т. к. текущая практика бумажного документооборота является достаточно устойчивой и с большего решает все необходимые задачи, то основная цель рекомендаций – управление электронными данными.

Также важным принципом, которого необходимо придерживаться при разработке рекомендаций, это соблюдение принципа достаточности, т.е. максимальное исключение всех требований, которые не являются важными для целей отрасли. Если данное требование не соблюсти, то есть риск, что полученные рекомендации не будут работать на практике.

УДК 006.91-024.24(476)

МОДУЛЬНЫЙ ПОДХОД ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО АУДИТА

Скачек В.Н., Астафьева Л.Е.

*Белорусский государственный институт метрологии
Минск, Республика Беларусь*

Целью настоящей работы является организация метрологического аудита на основе модульного подхода, суть которого состоит в разделении всего множества имеющихся объектов и областей метрологического аудита по обнаруженным сходствам и различиям на отдельные группы (модули) исходя из признаков, присущих каждому ее элементу.

Тот факт, что метрологический аудит с 27 ноября 2020 года получает законодательную основу, как проведение работ по анализу обеспечения единства измерений при производстве продукции, выполнении работ и (или) оказании услуг, подтверждает необходимость более детального подхода к выбору объектов и содержанию метрологического аудита.

Объекты метрологического аудита установлены в правилах проведения метрологического аудита путем их перечисления и включают:

- систему управления измерениями;
- процессы измерений;
- измерительное оборудование;
- метрологическое подтверждение пригодности измерительного оборудования и процессов измерений;
- метрологическую прослеживаемость;
- техническую документацию, устанавливающую метрологические и технические требования, документы системы обеспечения единства измерений и системы качества организации по управлению измерениями.

Процесс метрологического аудита включает следующие этапы и процедуры:

1. Определение целей проведения метрологического аудита. Главной целью использования процесса метрологического аудита является предоставление оперативной информации руководству организации. Такая информация позволя-

ет руководству оценить соответствуют ли результаты метрологической деятельности организации запланированным целям по качеству выпускаемой продукции и наметить пути развития метрологического обеспечения производства.

2. Разработка плана проведения метрологического аудита, который включает: выбор методов проведения, определение типа требуемой информации и источников ее получения, определение методов сбора необходимых данных, разработка форм для сбора данных, выборочного плана и определение объема выборки.

3. Реализация плана (сбор и анализ данных).

4. Интерпретация полученных результатов и их доведение до заявителя.

Несмотря на определенное сходство процесса метрологического аудита при производстве продукции, проведении испытаний, оказании услуг и др. есть небольшие отличия в процедурах, входящих в определенные этапы их оценивания.

Формирование заявки осуществляется исходя из потребности организации в проведении метрологического аудита. Ясное и четкое изложение цели, области и объектов метрологического аудита является ключом к его успешному проведению.

Модульный подход позволяет построить проведение метрологического аудита индивидуально под каждую организацию с учетом существующих проблем и вопросов в области обеспечения единства измерений.

Ниже приведен примерный перечень модулей с учетом специфики обеспечения единства измерений:

- М1 Управление измерениями при производстве продукции;
- М2 Управление измерениями при проведении испытаний;
- М3 Управление измерениями при оказании услуг;
- М4 Измерения и их результаты;
- М5 Методики (методы) измерений;
- М6 Измерительное оборудование;
- М7 Метрологическая прослеживаемость;
- М8 Конструкторская, технологическая и иная производственная документация, устанавливающая метрологические требования;
- М9 Нормативные правовые акты, технические нормативные правовые акты и другие документы системы обеспечения единства измерений;
- М10 Документы организации по управлению измерениями;
- М11 Поверка;
- М12 Калибровка;
- М13 Аттестация методик выполнения измерений;
- М14 Фасованные товары;

– М15 Погрешность и неопределенность результатов измерений;

– М16 Организация метрологического обеспечения производства в соответствии с требованиями Закона Республики Беларусь от 5 сентября 1995 г. № 3848-ХІІ «Об обеспечении единства измерений» в редакции Закона Республики Беларусь от 11 ноября 2019 г. N 254-3".

Модуль М1 содержит оценивание элементов, необходимых для постоянного управления процессами измерений; управление идентифицированными процессами измерений и необходимыми вспомогательными процессами; управление ресурсами, обеспечивающими качество измерений; наличие и функционирование метрологической службы, поверочных и калибровочных лабораторий; мониторинг, анализ и улучшение системы управления измерениями.

Для *модуля М2* проводится оценивание элементов, необходимых для постоянного управления процессами измерений; управление ресурсами, обеспечивающими качество измерений; наличие и функции ответственного за обеспечение единства измерений; мониторинг, анализ и улучшение системы управления измерениями.

При оценивании *модуля М4* проверяется: использование единиц измерений, допущенных к применению в Республике Беларусь, приведенных в документах системы управления измерениями; использование в процессах измерений измерительного оборудования, отградуированного в единицах измерений, допущенных к применению в Республике Беларусь; наличие в документах, определяемых в процессе измерений значений измеряемых величин, с указанием, максимально допустимой погрешности или, допустимой неопределенности, установленных исходя из требований к продукции; правильность выбора метод измерений, измерительного оборудования для получения результатов измерений, условий проведения измерений и методов обработки результатов измерений; правильность отнесения результатов измерений, определяемых в процессе измерений, к сфере законодательной метрологии.

В процессе метрологического аудита *модуля М5* оценивается: соответствие требованиям Закона «Об обеспечении единства измерений», нормативным правовым актам, техническим нормативным правовым актам и другим документам системы обеспечения единства измерений, процедурам организации по управлению документацией и проведению метрологической экспертизы; соответствие протоколов измерений, требованиям, установленным для оформления результатов измерений; соответствие фактически используемого измерительного оборудования, установленному; документы по регистрации и мониторингу условий измерений и соответствие фактических условий предписанным в методиках (методах)

измерений; наличие методик измерений на рабочих местах и документов по их аттестации.

Модуль М6 включает: средства измерений; эталоны (при их наличии); стандартные образцы; программные средства, используемые при измерениях и вычислениях результатов измерений; технические устройства, которые участвуют в процессе измерений и имеют измерительные функции и параметры (в т.ч. испытательное оборудование, как средство испытаний, представляющее собой техническое устройство для воспроизведения условий испытаний); производственные условия и условия окружающей среды при их эксплуатации; метрологическое подтверждение пригодности измерительного оборудования на соответствие требованиям по обеспечению единства измерений, установленным в Законе «Об обеспечении единства измерений», нормативных правовых актах и технических нормативных правовых актах

Метрологический аудит *модулей М5 и М6* всегда проводится с *модулем М7* по оценке и подтверждению наличия метрологической прослеживаемости.

Прогнозируется, что наиболее востребованным для проведения метрологического аудита до внедрения Закона Республики Беларусь от 5 сентября 1995 г. № 3848-ХП «Об обеспечении единства измерений» в редакции Закона Республики Беларусь от 11 ноября 2019 г. N 254-З" будет *модуль М16*. Это связано, прежде всего, с внесе-

нием в законодательство ранее не используемых терминов и их определений, таких, как регистрация средства измерений, уполномоченное юридическое лицо, метрологическая оценка, метрологическая экспертиза средств измерений и стандартных образцов, метрологические требования и обязательные метрологические требования, точность измерений, стандартный образец, первичная референтная методика (метод) измерений, референтная методика (метод) измерений и др., а также правовым регулированием области обеспечения единства измерений, полномочиями субъектов обеспечения единства измерений, метрологической оценки, и т.п.

Предполагается, что при использовании модульного подхода значительно сократится время на получение необходимой информации, так как не потребуется повторений оцениваемых объектов метрологического аудита.

Литература

1. Закон Республики Беларусь от 5 сентября 1995 г. № 3848-ХП «Об обеспечении единства измерений» в редакции Закона Республики Беларусь от 11 ноября 2019 г. N 254-З".
2. Барташевич Д.П. Метрология в фокусе экономики и общества // Метрология и приборостроение. – 2020, № 2. – С. 5–9.
3. Астафьева Л.Е., Скачэк В.Н. / Метрологический аудит и обеспечение единства измерений на производстве // Метрология и приборостроение. – 2020, № 3. – С. 16–21.

УДК 618

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ МЕТОДОВ СОЗДАНИЯ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ

Соломахо В.Л.¹, Багдюн А.А.²

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный институт метрологии
Минск, Республика Беларусь

Одной из первоочередных задач метрологии в микро- и нанодиапазоне является создание стандартных образцов (СО) размера, состава, структуры и свойств материала для обеспечения высокотехнологичного измерительного оборудования необходимым набором средств, воспроизводящих шкалу единиц, для осуществления калибровки средств измерений, разработки методик измерений, контроля результатов измерений, обеспечения прослеживаемости к эталону.

Согласно ГОСТ Р ИСО 21501-4-2012 «Получение распределения частиц по размерам. Оптические методы оценки отдельных частиц. Часть 4. Счетчики частиц в воздухе для чистых зон, работающие на принципе рассеяния света», первыми пунктами калибровки счетчиков частиц

являются калибровка по размерам частиц и проверка правильности установки размера [1]. В качестве частиц для калибровки рекомендуются частицы полиуретанового латекса (PSL). На данный момент он является самым распространенным СО для передачи единицы длины в микро- и нанометровом диапазоне измерений. Он участвует в передаче единицы длины от эталонных средств измерений к рабочим.

Однако СО монодисперсного полиуретанового латекса являются весьма дорогостоящими и требуют специальных условий хранения. Альтернативой может служить метод создания монодисперсных частиц, в частности, с помощью генератора частиц FMAG 1520 (Flow Focusing Monodisperse Aerosol Generator), способного

генерировать аэрозоли с известным диаметром из других, более дешевых расходных материалов.

Генератор монодисперсных аэрозолей с фокусировкой потока (F MAG), Модель 1520, компании MSP, может генерировать монодисперсные капли в широком диапазоне от 17 мкм до 72 мкм и жидкие и твердые частицы от 0,8 мкм до 12 мкм известного диаметра и концентрации из множества жидких растворов.

В данной работе проведены исследования аэрозолей воспроизводимых генератором аэрозолей F MAG 1520 из раствора NaCl в дистиллированной воде, как альтернативы CO латексных частиц номиналами 1; 3 и 5 мкм. Измерения проводились с использованием лазерного спектрометра аэрозолей LAS 3340A, метрологические характеристики которого представлены в таблице 1.

Таблица 1

Наименование характеристики	Значение характеристики
Диапазон измерения размеров частиц, мкм	от 0,09 до 7,50
Относительная погрешность измерения частиц размером 0,1 мкм, не более, %	5
Количество каналов	99

Генератор монодисперсных аэрозолей с фокусировкой потока состоит из четырех основных компонентов: генератора капель, электрического ионизатора, сушильной колонки и системы струйного управления потоком и управления приборами.

Диаметр микроструи, генерируемой фокусировкой потока, может рассчитываться следующим уравнением [2]:

$$D_j \cong \left(\frac{8\rho_l}{\pi^2\Delta P_g} \right)^{1/4} Q^{1/2}, \quad (1)$$

где D_j – диаметр струи, ρ_l – плотность жидкости, ΔP_g – перепад давления газа, а Q – расход жидкости.

Экспериментальные результаты показывают, что фактический диаметр генерируемой струи примерно на 20 % меньше, чем прогнозировалось уравнением (1).

Оптимальная частота возбуждения может быть определена из классической теории малых возмущений Рэлея, которая показывает, что возбуждения с длиной волны, превышающей окружность струи, будут нестабильны, при этом нестабильность увеличивается экспоненциально.

Скорость струи может рассчитываться исходя из диаметра струи, полученного фокусировкой потока и расхода жидкости с использованием уравнения (2):

$$v_j = \frac{4Q}{\pi D_j^2}. \quad (2)$$

Частота вибрации рассчитывается уравнением (5):

$$f = v_j \lambda. \quad (3)$$

Диаметр капль можно рассчитать непосредственно из рабочих диаметров генератора F MAG с применением уравнения (4):

$$D_d = \left(\frac{6Q}{\pi f} \right)^{1/3}, \quad (4)$$

где D_d – диаметр капль, Q – расход жидкости, а f – частота вибрации.

Геометрический диаметр частицы можно рассчитать из уравнения (5):

$$D_p = C^{1/3} D_d, \quad (5)$$

где D_p – геометрический диаметр частиц, а C – объемная концентрация нелетучих растворенных веществ в растворе.

Концентрация должна включать в себя любые нелетучие примеси, присутствующие в растворе, и, поэтому, при генерировании мелких частиц (менее 1 мкм) чистота раствора должна быть максимальной.

На основании вышеизложенной информации можно подобрать входные параметры генератора F MAG для получения аэрозолей на основе раствора NaCl в дистиллированной воде с номинальными размерами частиц 1; 3 и 5 мкм. Эти параметры представлены в таблице 2.

Таблица 2

Ном. р-р частиц, мкм	Расход жидкости (Q), мл/ч	Частота вибрации (f), кГц	Объемная концентрация (C), %
1	2	210	0,020
3	4	137	0,175
5	4	154	0,900

Ниже на рисунках 1, 2 и 3 представлены результаты измерений частиц размером 1; 3 и 5 мкм. Моды распределений составляют 0,988; 2,934 и 4,880 мкм соответственно.

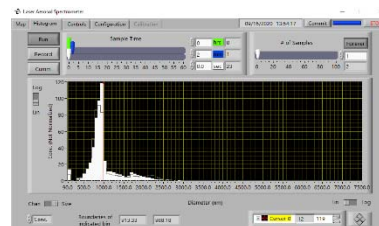


Рисунок 1 – Результаты измерений аэрозоля номинальным размером 1 мкм

Анализируя полученные графики, можно предположить, что расчеты верны и генератор воспроизводит частицы требуемого диаметра, так как мода распределения практически совпадает с номинальными значениями генерируемых частиц, а их распределение близко к нормальному. Несовпадения значений можно объяснить недостаточной точной объемной концентрацией частиц в

созданных растворах. Также можно сказать, что стандартное отклонение среднего значения размера частиц колеблется в пределах 2,5 % – 3 %.

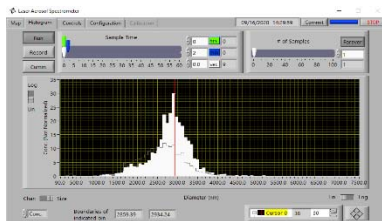


Рисунок 2 – Результаты измерений аэрозоля номинальным размером 3 мкм

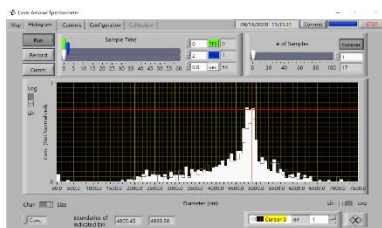


Рисунок 3 – Результаты измерений аэрозоля номинальным размером 5 мкм

УДК 004.896

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА БЕСФИЛЬЕРНОГО ВОЛОЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Томашук А.С.

НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
Киев, Украина

Введение. В процессе изготовления протяженных изделий, таких как, стержень, проволока, волокно, за методом бесфильтрного волочения, необходимо придерживаться требуемых значений параметров его общей физико-математической модели [1]. В случае отклонения любого из значений от заданного значения, результатом может стать дефект изделия, который в свою очередь влияет на качество готового продукта [2].

Ранее, нами было разработано оптическое устройство для контроля распределений диаметра и температуры на поверхности таких изделий в зоне их деформации [3].

На сегодняшний день, необходимо совместить обе системы – машину для проведения процесса бесфильтрного волочения протяженного изделия и устройство контроля его параметров с целью автоматизации процесса [4].

Так как процесс динамический и зависит от многих факторов, в том числе и от внешних возбудителей, которые не являются частью системы – не входят в состав физико-математической модели, тогда в такой процесс должны быть включены алгоритмы, которые позволили бы корректировать данную систему, приводя план действий ее поведения к установленному ранее. Таким образом, система становится автоматизи-

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что генератор FMAГ способен генерировать частицы требуемого диаметра, которые, на сегодняшний момент, не способны в полной мере заменить латексные частицы (PSL). При этом есть возможность приблизиться к требованиям ГОСТ Р ИСО 21501-4-2012 путем эффективного комбинирования большим количеством источников изменчивости, влияющих на дисперсию получаемых данных.

Литература

1. ГОСТ Р ИСО 21501-4-2012 «Получение распределения частиц по размерам. Оптические методы оценки отдельных частиц. Часть 4. Счетчики частиц в воздухе для чистых зон, работающие на принципе рассеяния света», первыми пунктами калибровки счетчиков частиц являются калибровка по размерам частиц и проверка правильности установки размера.
2. Generation of Steady Liquid Microthreads and Micron-Sized Monodisperse Sprays in Gas Streams / Alfonso M. Gañán-Calvo; PHYSICAL REVIEW LETTERS, 1998, volume 80, number 2. – P. 286.

рованной, но действия ее алгоритмов все еще поддаются логическому поведению.

Если мы хотим, чтобы наша система была автоматизированной, и кроме этого, обучалась на успехах и неудачах своего опыта работы с целью своего совершенствования, в таком случае могут быть применены методы машинного обучения.

Цель исследования. Целью исследования является формирование подхода, при котором качество конечного изделия, которое изготавливается методом бесфильтрного, высокотемпературного изготовления, с помощью ввода в систему, дополнительно, метода машинного обучения повышалось бы свой уровень в режиме реального времени.

Анализ информационных источников. В работах [5–7] исследовался процесс бесконтактного изготовления оптического волокна, металлических проволоки и трубы. Одним из результатов стало определение отношения распределения температуры на поверхности участка изделия к его длине в зоне деформации.

В работах [8, 9] применялось моделирование процесса бесфильтрного волочения на основе модели конечных элементов, которая реализована в программном обеспечении (ПО) DEFORM 3D и DEFORM 2D. Был проведен анализ пара-

метров процесса, в том числе, теплопередачи и формования протяженных изделий.

В работе [10] исследовался процесс бесфиллерного волочения проволоки из стали диаметром 1,6–2 мм. Одной из задач данной работы была разработка модели искусственной нейронной сети, которая основана на результатах экспериментов, цель которой – прогнозирование результатов поведения процесса бесфиллерного волочения проволоки.

По утверждению авторов, исходя из аннотаций к работам (полные работы на момент написания этого доклада не были получены), в работах [11, 12] были применены модели искусственного интеллекта с целью оптимизации процесса бесфиллерного волочения проволоки. В работе [11], предварительно, было произведено математическое моделирование процесса в ПО DEFORM. В работе [12] модель искусственного интеллекта основана на методе искусственной нейронной сети за методом обратного распространения ошибки.

Формирование метода. Есть необходимость в формировании отдельного плана действий (ПД), в котором соблюдаются температурный режим, а также установлены значения всех параметров процесса бесфиллерного волочения.

Имеются известные входные данные для проведения процесса бесфиллерного волочения протяженного объекта: параметры процесса, температурное распределение на поверхности объекта и его геометрические параметры.

В процессе производства могут возникнуть следующие сложности:

– первое, предположим, что условия, при которых были получены входные данные и те, что имеются сейчас, приблизительно равны, а проблемой является получение изделия с требуемыми параметрами повышенной точности – имеют меньшее отклонение значений в каждом из параметров;

– второе, предположим, что условия, при которых были получены входные данные, не соответствуют условиям, при которых будет происходить изготовление в следующий раз.

Входные данные могут быть представлены функцией $f(p_1, p_2, \dots, p_i)$, где p – значение отдельного параметра.

Входные данные каждой из функций всегда описывают приближенный ПД для проведения процесса волочения – не идеальное поведение. Следовательно, в режиме реального времени, значения отдельных параметров могут всегда изменяться с целью совершенствования процесса изготовления. Как результат этого, имеем 3 ПД:

– ПД, при котором происходит грубая обработка, результатом которого может стать дефект изделия;

– ПД, при котором происходит обработка, согласно предложенному ПД – известные входные

данные, результатом которого может стать изделие с требуемыми параметрами или изделие с наличием мелких дефектов, большие/меньшие отклонения от требуемых.

– ПД, при котором происходит совершенная обработка, результатом которого является получение изделия с требуемыми параметрами с требуемым или повышенным значением точности (значение параметра с меньшим отклонением).

Процесс решения основной задачи должен быть основан на итерации процедур изменений отдельных ПД, а именно изменений значений параметров с некоторым заданным отклонением от полученного значения на предыдущей итерации.

Изменение значений отдельных параметров, которое влияет на поведение общей системы, в том числе участие их в решении подзадач и моделировании, является вопросом метода машинного обучения.

Как вариант для решения общей задачи можем выделить следующие подзадачи признаков:

– Класс (подзадача) признаков 1: скорость подачи заготовки; скорость вытягивания изделия; скорость вращения изделия; длина участка заготовки в зоне деформации.

– Класс (подзадача) признаков 2: напряжение в системе нагрева, в конструкции которой элементом нагрева является индукционная катушка; сила тока в системе нагрева, в конструкции которой элементом нагрева является индукционная катушка.

– Класс (подзадача) признаков 3: диаметр заготовки; диаметр заготовки в зоне деформации; диаметр изделия.

– Класс (подзадача) признаков 4: температура поверхности заготовки вне зоны деформации; температура поверхности заготовки в зоне деформации; температура поверхности изделия вне зоны деформации (в зоне охлаждения).

– Класс (подзадача) признаков 5: температура поверхности заготовки вне зоны деформации – в зоне, где на нее воздействует температура окружающей среды; температура поверхности изделия вне зоны деформации – в зоне его охлаждения, где на него воздействует температура окружающей среды.

Выводы по работе за указанный период времени. Проведен краткий обзор информационных источников в отношении совершенствования качества изделия получаемого с помощью сопряжения процесса бесфиллерного волочения с методами машинного обучения.

Литература

1. Jafari H. Thermo-mechanical investigation of dieless wire drawing process / H. Jafari. – University of British Columbia, 2013. – P. 111.

2. Хаяк Г.С. Волочение проволоки из цветных металлов и сплавов / Г.С. Хаяк. – М.: Металлургия, 1967. – 151 с.
3. Tomashuk A. Device for monitoring the temperature and diameter of an extended cylindrical object in the high-temperature manufacturing process / A. Tomashuk // IOP conference series: Materials science and engineering. – 2018. – Vol. 450. – 032018.
4. Method and device for testing the parameters of the wire from NiTi alloy in the high-temperature manufacturing process with use an inert gas / R. Galagan, A. Muraviov, A. Tomashuk // IOP conference series: Materials science and engineering. – 2019. – Vol. 537. – 032072.
5. Modeling by numerical reduction of modes for multivariable control of an optical-fiber Draw process / K.-M. Lee, Zh. Wei, Zh. Zhou // IEEE transaction of automation Science and Engineering. – 2006. – Vol. 3. – Iss. 1. – P. 119–130.
6. Numerical analysis of continuous die-less wire drawing process / R.J. Mohammed, J. Alsalaet, A.A. Nassar // International journal of engineering & technology. – 2018. – Vol. 7. – P. 699–704.
7. Effective temperature distribution and drawing speed control for stable dieless drawing process of metal tubes / T. Furushima, S. Hirose, K. Manabe // Journal of solid mechanics and materials engineering. – 2009. – Vol. 3. – Iss. 2. – P. 236–246.
8. Formability discussion in dieless drawing of stainless steel tubes / Y.M. Hwang, Z.S. Li, T.U. Lin // Key engineering materials. – 2014. – Vol. 626. – P. 10–15.
9. Hwang Y.-M. Formability analysis and oxidation layer effects in dieless drawing of stainless steel wires / Y.-M. Hwang, H.-H. Liu // Metals. – 2019. – Vol. 9. – 828.
10. Experimental study and artificial neural networks prediction of effective parameters in continuous die-less wire drawing process / R.J. Mohammed, J.Kh. Ali, A.A. Nassar // Bashar journal of engineering sciences. – 2019. – Vol. 19. – Iss. 1. – P. 52–63.
11. Optimization of dieless drawing process based on artificial intelligence / Y. He, X. Liu, J.X. Xie, X.J. Ban. – 2008. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/289307389_Optimization_of_dieless_drawing_process_based_on_artificial_intelligence.
12. Prediction model of wire diameter in dieless drawing process based on BP neural network / Y.-Q. Yang, Y. He, X. Liu, J.-X. Xie. – 2008. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/292530528_Prediction_model_of_wire_diameter_in_dieless_drawing_process_based_on_BP_neural_network.

УДК 617.3

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТОПЫ**Цапенко В.В., Терещенко Н.Ф.***НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
Киев, Украина*

В современной биомедицинской инженерии достаточно молодым и перспективным направлением является клинический анализ двигательной деятельности – исследования различных патологий ходьбы и основной стойки, с использованием методов биомеханики. Не вызывает сомнений значимость оценки функционального состояния опорно-двигательной системы у пациентов ортопедического и неврологического профиля [1]. В последние годы количество заболеваний, травм и патологий опорно-двигательного аппарата неуклонно растет, что существенно влияет на качество жизни населения. Различные заболевания и повреждения опоры нередко сопровождаются серьезными функциональными нарушениями двигательного аппарата, снижением силы и тонуса мышц, утратой способности к нормальным движениям, что в итоге приводит к инвалидности и последующей потере трудоспособности [2]. Диагностика осанки человека не была бы полной без измерения и оценки состояния опорно-рессорных свойств ее стопы. Стопа является структурным сегментом опорно-двигательного аппарата, которая обеспечивает его стато-локомоторную функцию, и представляет собой целостный морфофункциональный объект, от которого зависит двигательная функция человека. В течение жизни, в той или иной степени изменяются функциональные параметры стопы. В первую очередь они

касаются ее рессорной и опорной функций. В случае нарушений симметричности нагрузки стопы в положении стоя или при ходьбе, а также за счет снижения упругих характеристик стопы – снижаются ее амортизационные свойства, что приводит к увеличению ударной нагрузки и усилению вибрационных воздействий на весь опорно-двигательный аппарат [3, 4]. В связи с этим морфофункциональная диагностика состояния стоп является существенным элементом профилактики ряда нарушений опорно-двигательного аппарата, а прикладной аспект анализа локомоций человека, в современной биомедицинской инженерии, является очень актуальным и перспективным. Для объективной оценки влияния распределения нагрузки по стопе на локомоции необходимые клинический анализ движения и постурологичне обследование (исследование положения принятого телом) [5, 6]. С целью повышения точности исследования биомеханических параметров стопы, необходимо учесть влияние динамических нагрузок – реакций опоры на нагрузку соответствующей зоны цикла шага.

Цель исследования заключается в повышении точности и достоверности исследования биомеханических параметров стопы человека.

Методы исследования. Поставленная задача решается путем применения комплексного подхода с использованием анализа и обобщения

данных специализированной научно-методической литературы, визуального скрининга, бароподометрии и методов математической статистики. При исследовании использовался метод бароподометрии, который позволяет объективизировать исследования с учетом всех составляющих нагрузки стопы. В ходе исследования были определены основные пространственно-временные параметры цикла шага.

Основная функциональная единица ходьбы – это цикл шага (рисунок 1). Цикл шага – это время от начала контакта конечности с опорой к следующему такому же контакту этой же конечностью. Среднее время цикла шага, при нормальной ходьбе приближается к 1 с. Цикл шага, для каждой конечности, состоит из трех основных периодов: периода опоры, переноса и двойной опоры [1]. Исследованиями в области биомеханики установлено, что усилия, которые прикладываются во время движения имеют вертикальные и горизонтальные составляющие. Походка – это сложное циклическое движение, связанное с отталкиванием тела от опорной поверхности и перемещением его в пространстве. Усилия, которые при этом применяются имеют динамический характер. Характерным для нормальной походки является постоянное хранение опоры на одну или две конечности.

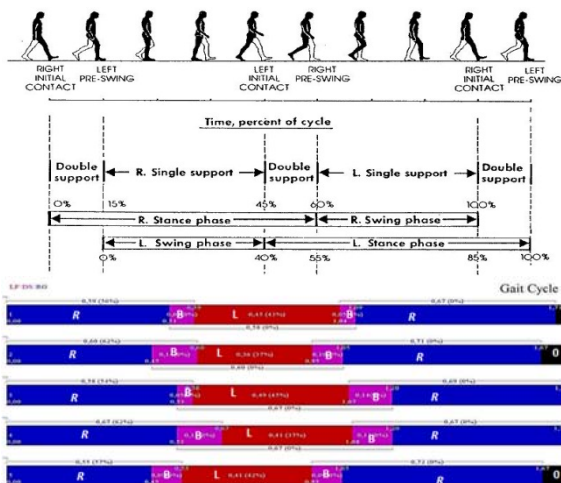


Рисунок 1 – Цикл шага

На рисунке 1 красным цветом (отмечено буквой L), обозначены периоды опоры на левую нижнюю конечность, синим (отмечено буквой R) – на правую, розовым цветом (отмечено буквой B), обозначены периоды двойной опоры (на две конечности), черный цвет (отмечено 0), характеризует отсутствие контакта. Проанализировав цикл шага можно прийти к выводу, что период переноса одной конечности равен периоду одиночной опоры на противоположную конечность [1]. В то же время, для правой, период опоры на правую конечность больше чем на левую, для левой – наоборот.

С целью анализа распределения динамической нагрузки на опорную поверхность, введем коэффициент динамической нагрузки K_{dl} [1].

$$K_{dl} = P_i \cdot S_i \cdot t_i \quad (1)$$

где P_i – значение нагрузки на i -ю характеристику цикла шага стопы (период отталкивания, переката и приземления), кг/м²; S_i – площадь характеристики, м²; t_i – время действия характеристики, с.

В ходе проведенных исследований был установлен период опоры каждой характеристики цикла шага стопы при одиночной опоре, на основе полученных данных был рассчитан коэффициент динамической нагрузки каждой области стопы. Результаты исследования для динамической нагрузки приведены в таблице 1 (где med – внутренний, lat – внешний край стопы) [1].

Таблица 1 – Распределения динамической нагрузки

Х-ка цикла шага		t, с	S, см ²	P, кг/см ²	K _{dl} , кг·с
Area A	lat	0,25	77	0,0464	0,88
	med			0,0474	0,9
Area B	lat	0,11	24	0,0433	0,11
	med			0,0332	0,09
Area C	lat	0,25	49,5	0,0546	0,68
	med			0,0538	0,67
Area F	lat	0,23	85	0,0462	0,91
	med			0,0511	1
Area E	lat	0,09	34	0,0378	0,11
	med			0,0479	0,14
Area D	lat	0,3	57	0,0478	0,81
	med			0,0514	0,88

Таким образом, анализ полученных данных показывает, что максимальный контакт за единицу времени имеет передний отдел стопы (фаза отталкивания – Area A, F) далее – задний отдел стопы (фаза приземления – Area C, D) и минимальный – средний отдел стопы (фаза переката – Area B, E).

Выводы. Таким образом проблема оценки биомеханических параметров и ранней диагностики повреждений и деформации стоп актуальна при выборе способов профилактики, лечения, изготовления индивидуальных ортезов стопы и оценки их эффективности.

Бароподометричне исследования стопы вместе с анализом количественных характеристик является методом получения релевантных биометрических данных, имеющих важное значение в практической биомедицинской инженерии. Розделение стопы на зоны, в процессе анализа, дает возможность получить достоверную количественную оценку распределения нагрузки по опорной поверхности стопы и проводить его комплексный анализ на основании анатомо-функциональных представлений. Предложен новый метод анализа динамической нагрузки на стопу, который сводится к определению коэффициента динамической нагрузки, который показывает наиболее

нагруженную опору в единицу времени. Установлено, что максимальное значение динамической опоры за единицу времени приходится на передний отдел стопы, минимальное – на средний отдел стопы. Теоретические расчеты нашли экспериментальные подтверждения.

Практическое значение полученных результатов заключается в усовершенствовании существующих методов диагностики функциональных параметров стопы, разработке, изготовлении и внедрении в медицинскую практику комплексной диагностической системы исследования биомеханических параметров стопы человека.

Литература

1. Tsapenko V. Analysis of Dynamic Load on Human Foot / V. Tsapenko, M. Tereshchenko, G. Tymchik, S. Matvienko and V. Shevchenko // 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 400–404. DOI: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088788

2. Tsapenko V. Models of evaluation of biomechanical parameters of lower extremities in children / V.V. Tsapenko, M.F. Tereshchenko, G.S. Tymchik // KPI Science News 2019 / 1, 67–75. DOI: 10.20535/kpi-sn.2019.1.158812

3. Кашуба В.А. Биомеханика осанки: монография. – Киев: Олимпийская литература, 2003. – 280 с.

4. Tsapenko V. Method of study of spatial parameters of the human foot / V. Tsapenko, N. Tereshchenko // in Proc. XI Int. Sci. Tech. Conf. Integrated Intellectual Robotechnical Complexes (IIRTC-2018), Kyiv, Ukraine, May 22–23, 2018, pp. 157–159.

5. Цапенко В.В. Анализ влияния разновысокости нижних конечностей на биомеханические параметры походки / В.В. Цапенко, Н.Ф. Терещенко // Вестник Киевского политехнического института. Серия: Приборостроение. – 2019. – Вып. 57 (1). – С. 102–107. DOI: 10.20535/1970.57(1).2019.172034

6. Ромакина Н. Использование методов биомеханики в оценке состояния и коррекции патологии опорно-двигательной системы (обзор) / Н. Ромакина, А. Федонников, С. Киреев // Саратовский научно-медицинский журнал. 2015. – № 3. – С. 310–316.

УДК 621.382

ОБЛУЧЕННЫЕ ГАММА-КВАНТАМИ ПЛЕНКИ ПОЗИТИВНОГО РЕЗИСТА ФП9120 НА ПЛАСТИНАХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Бринкевич Д.И.¹, Просолович В.С.¹, Черный В.В.²

¹Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Полимерные композиты широко используются в качестве резистов при производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем [1, 2]. Основным типом позитивных резистов являются диазохинон-новолачные (ДХН) резисты, представляющие собой композит из светочувствительного орто-нафтохинондиазида и фенол-формальдегидной смолы обычно в соотношении 1:5 [3]. В качестве растворителей чаще всего используются смеси ацетатов спиртов и гликолей. Целью настоящей работы было исследование модификации спектров нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) пленок позитивного диазохинон-новолачного резиста ФП9120 при облучении γ -квантами ⁶⁰Со.

Методы. Пленки позитивного диазохинон-новолачного резиста ФП9120 толщиной 2,5 и 5,0 мкм наносились на поверхность Si методом центрифугирования [4]. В качестве подложек использовались пластины (диаметром 100 мм) монокристаллического кремния марки КДБ-10 с ориентацией (111). Облучение резистивных пленок γ -квантами дозой до 300 кГр проводилось на установке МРХ- γ -25М с источником ⁶⁰Со. Мощность поглощенной дозы составляла

$0,12 \pm 0,003$ Гр/с. Спектры НПВО структур резист-кремний в диапазоне $\nu = 400\text{--}4\,000$ см⁻¹ регистрировались при комнатной температуре ИК-Фурье спектрофотометром ALPHA (Bruker Optik GmbH). Разрешение составляло 2 см⁻¹, количество сканов – 24. Коррекция фона проводилась перед каждым измерением.

Экспериментальные результаты. Заметные изменения спектров НПВО резистивных пленок наблюдались только при поглощенных дозах $D \geq 200$ кГр. При меньших дозах спектры облученных и исходных пленок совпадали. Новых полос НПВО в облученных пленках резиста ФП9120 не обнаружено. Облучение дозой свыше 200 кГр приводило к снижению интенсивности практически всех полос НПВО. Исключение составили лишь полосы в диапазоне волновых чисел $1\,550\text{--}1\,670$ см⁻¹, обусловленные колебаниями ароматического кольца (рисунок 1) у полосы, обусловленной скелетными колебаниями ароматического кольца [5], наблюдается несколько максимумов – наиболее интенсивный при $1\,595$ см⁻¹ и малоинтенсивные при $1\,606$, $1\,560$ и $1\,540$ см⁻¹ (рисунок 1). При γ -облучении дозой свыше 200 кГр интенсивность основной полосы при $1\,595$ см⁻¹

возрастала. Остальные максимумы исчезали; на их месте наблюдались только перегибы. По нашему мнению, такого рода изменения в ходе радиолита могут быть связаны с уменьшением доли ароматических фрагментов, образующих межмолекулярную водородную связь с кислыми О-Н группами фенолов. Изменение структуры полосы поглощения при $1540\text{--}1620\text{ см}^{-1}$ обусловлено изменениями в количестве и природе заместителей при ароматическом кольце в ходе облучения.

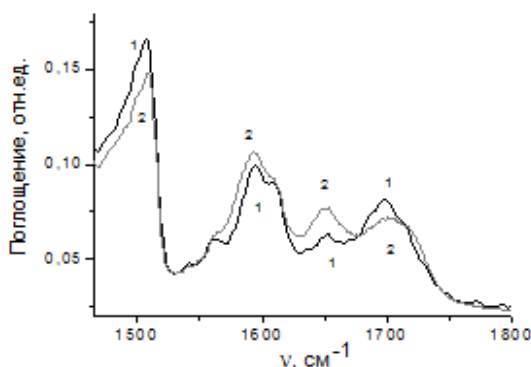


Рисунок 1 – Спектры НПВО γ -облученных пленок резиста ФП9120 толщиной 2,5 мкм в области колебаний ароматического кольца и С=О связей. Доза, кГр: 1 – 0; 2 – 270

Облучение γ -квантами дозой свыше 200 кГр приводило к снижению интенсивности валентных колебаний О-Н и алифатических С-Н связей. Наблюдалось также снижение максимумов полос деформационных колебаний С-Н связей в диапазоне волновых чисел $600\text{--}900\text{ см}^{-1}$. Отметим также, что при облучении происходило перераспределение интенсивности полос колебаний, обусловленных метиленовыми $-\text{CH}_2-$ и метильными $-\text{CH}_3$ группами.

Обнаруженное методами ИК-спектроскопии НПВО снижение интенсивности поглощения алифатических С-Н связей и фенольных О-Н групп при γ -облучении ДХН-резиста происходит в результате бирадикальных процессов рекомбинации и диспропорционирования, а также в результате молекулярных процессов фрагментации возбужденных частиц фенолформальдегидной смолы, в частности, дегидратации и дегидрирования [6]. Радикалы бензильного типа в ходе рекомбинации образуют новые $-\text{CH}_2-$ фрагменты, что объясняет наблюдаемое при радиолите перераспределение интенсивности полос колебаний, обусловленных метильными ($\nu = 2960\text{ см}^{-1}$) и метиленовыми ($\nu = 2930\text{ см}^{-1}$) группами, в пользу последних.

В области валентных колебаний кратных связей при облучении наблюдается снижение интенсивности максимума полосы $\sim 1700\text{ см}^{-1}$

при одновременном ее уширении и смещении в высокоэнергетическую область на. В исходных пленках резиста полоса поглощения $\sim 1700\text{ см}^{-1}$ обусловлена валентными колебаниями карбонильной группы *o*-нафтохинондиазида. Уширение этой полосы при одновременном смещении в высокоэнергетическую область на $\sim 30\text{ см}^{-1}$ в процессе γ -облучения, по нашему мнению, связано с двумя типами процессов. Во-первых, в результате передачи энергии возбуждения с макромолекул фенол-формальдегидной смолы на остатки *o*-нафтохинондиазида происходит его разложение. Во-вторых, в качестве продуктов радиационно-индуцированных превращений резиста образуются карбонилсодержащие соединения, которые достаточно сильно отличаются между собой по строению и, соответственно, по положению максимума поглощения С=О группы.

Интенсивность полосы с максимумом при 1650 см^{-1} , обусловленной валентными колебаниями С=О связей в формальдегиде $\text{CH}_2=\text{O}$, в ходе γ -облучения существенно возрастает (рисунок 1). Это соединение в небольшом количестве неизбежно содержится в формальдегидных смолах. Однако непрореагировавший в ходе производства полимера $\text{CH}_2=\text{O}$ хорошо присоединяет электроны, атомы водорода и углеродцентрированные радикалы [7] по кратной поляризованной связи. Последующая рекомбинация гидроксиметильных радикалов или присоединение этих радикалов по ароматическим фрагментам должны приводить к достаточно быстрому исчезновению формальдегида из полимерной пленки. Однако, полученные нами экспериментальные данные свидетельствуют о накоплении $\text{CH}_2=\text{O}$ в пленках ДХН-резиста при γ -облучении. Это однозначно свидетельствует о реализации процессов фрагментации гидроксиметильных остатков в составе полимерной смолы в ходе радиолита. Механизм такого рода реакций не описан в литературе. Очевидно, что возбужденные частицы фенол-формальдегидной смолы являются предшественником $\text{CH}_2=\text{O}$, но его образование может происходить как через стадию фрагментации кислородцентрированного радикала, так и в результате реализации молекулярного процесса. Косвенным подтверждением отщепления гидроксиметильных фрагментов от бензольных колец фенол-формальдегидной смолы в ходе γ -облучения ДХН-резиста является снижение интенсивности полосы при $\sim 1500\text{ см}^{-1}$, обусловленной валентными колебаниями углерод-углеродных связей при ароматических фрагментах.

Интенсивность широкой структурированной полосы с несколькими максимумами в диапа-

зоне волновых чисел $1\,050\text{--}1\,230\text{ см}^{-1}$, обусловленной валентными колебаниями С–О связей, в частности, в феноксильной группе (С–ОН), при облучении снижается. Соотношение максимумов этой полосы изменяется. Такое поведение полос НПВО в диапазоне волновых чисел $1\,050\text{--}1\,230\text{ см}^{-1}$ может свидетельствовать об образовании сложноэфирных сшивок с ОН-группами фенольного типа. Такие сшивки наблюдались ранее при имплантации Sb^+ в пленки резиста ФП9120, что приводило к увеличению их микротвердости [2]. С другой стороны, аналогичный эффект может давать также окисление фенолов до хинонметинов, в результате которого феноксильная С–ОН группа превращается в С=О.

Таким образом, выявленные в работе закономерности свидетельствуют о том, что облучение γ -квантами пленок ДХН-резиста на подложке монокристаллического кремния приводит к радиационно-индуцированным реакциям с участием боковых заместителей в составе фенолформальдегидной смолы (феноксильных, гидроксиметильных, метильных и метиленовых групп), а также фоточувствительного компонента – *о*-нафтохинондиазиды.

Литература

1. Моро У. Микролитография. Принципы, методы, материалы. В 2-х ч. Ч.2. / У Моро. – М: Мир, 1990. – 632 с.
2. Бринкевич Д.И. Ионная имплантация позитивных фоторезистов / Д.И. Бринкевич [и др.] // Микроэлектроника. – 2014. – Т. 43, № 3. – С. 193–199.
3. Roy D. DNQ-novolac photoresists revisited: ^1H and ^{13}C NMR evidence for a novel photoreaction mechanism / D. Roy [et al.] // Magnetic resonance in chemistry. – 2003. – V. 41. – P. 84–90.
4. Вабищевич С.А. Прочностные свойства структур фоторезист-кремний, γ -облученных и имплантированных ионами B^+ и P^+ / С.А. Вабищевич [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2016. – № 12. – С. 30–36.
5. Преч Э. Определение строения органических соединений. Таблицы спектральных данных / Э. Преч, Ф. Бюльманн, К. Аффольтер. – М.: Мир, Бином, 2006. – 438 с.
6. Вабищевич С.А. Адгезия к монокристаллическому кремнию пленок диазохинон-новолачного фоторезиста, имплантированных ионами бора и фосфора / С.А.Вабищевич [и др.] // Химия высоких энергий. – 2020. – Т. 54, № 1. – С. 54–59.
7. Бринкевич С.Д. Взаимодействие циклопентанона, γ -бутиролактона и их производных с α -гидроксиэтильными радикалами / С.Д. Бринкевич, И.А. Резцов, О.И. Шадыро // Химия высоких энергий. – 2014. – Т. 48, № 5. – С. 350–357.

УДК 528.85; 629.78

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЫХАЮЩИХ ЕЛЬНИКОВ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ АППАРАТУРЫ «МУЛЬТИСКАН»

Беляев Ю.В., Чумаков А.В., Попков А.П.

*Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Мониторинг хвойных лесов с помощью спутникового дистанционного зондирования важен из-за большого экологического и экономическо-го значения этих лесов. Работа выполнялась с целью разработки новой методики экспресс-обработки данных, поступающих с аппаратуры «Мультискан», работавшей на борту авиа-носителя, для решения задачи обнаружения патологий хвойных лесных насаждений по данным оптических измерений. Метрологическая калибровка аппаратуры «Мультискан» проводилась в аккредитованной лаборатории оптико-физических измерений НИИ ПФП БГУ им. А.Н. Севченко.

Для оценки патологий лесных массивов использовались данные, полученные с помощью цифровых камер видимого и инфракрасного теплового диапазонов аппаратуры «Мультискан» [1, 2] с борта самолета «Даймонд» 05.08.2020 и 06.08.2020 в районе аэродрома «Зябровка» в Гомельской области. Наличие в аппаратуре системы пространственного позиционирования и записи

координат съемки данных позволило осуществить пространственную привязку видео-данных.

По полученным изображениям в результате съёмки тепловизионной камеры «FLIR» аппаратуры «Мультискан» была разработана методика выявления уровня заболеваемости леса.

Обработка тепловых ИК-кадров осуществлялась ПО обработки изображений «Monteverdi 2-0.8». Метод классификации «Fusion Clustering» позволяет объединить несколько методов классификации в один, более достоверный. Слияние выполняется либо посредством «голосования большинством», либо с помощью метода комбинирования «dempster shafer». Результат обработки представлен на рисунке 1. В результате классификации выделяются сухие кроны (окрашены белым) среди зелёного леса (оттенки серого, вплоть до чёрного). Далее методика предполагает преобразование классифицированного кадра к бинарному изображению (рисунки 2, 3), подсчёт «белых» пикселей (сухие кроны), «чёрных» пик-

селей («здоровый» лес) и расчёт отношения P , как «индекса здоровья леса» в текущий момент. Расчет P – «индекса здоровья леса» проводится путем подсчета пикселей определенной яркости. «Белые пиксели в бинарном изображении соответствуют областям дефолиации хвойных иголок, «черные пиксели» – здоровым насаждениям с наличием хвои.

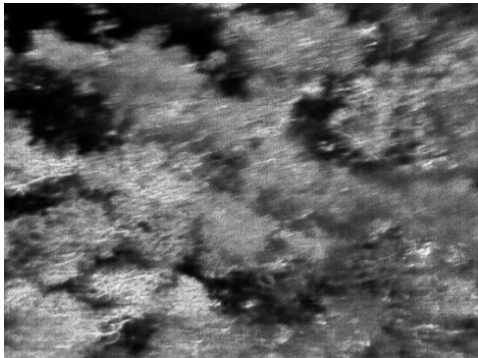


Рисунок 1 – Результат классификации

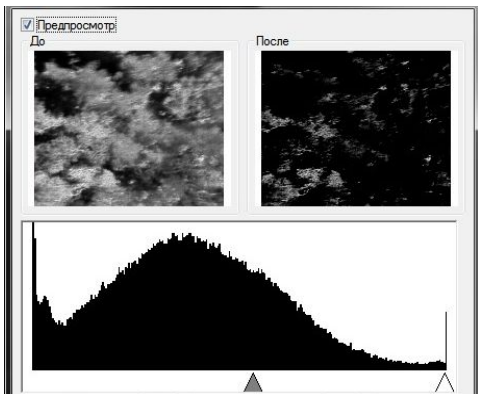


Рисунок 2 – Преобразование классифицированного изображения к бинарному с порогом 0,5 диапазона яркости бинарного кадра

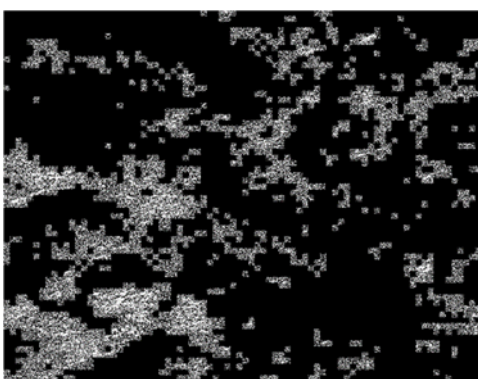


Рисунок 3 – Бинарное изображение

Отношения количества пикселей, соответствующих сухим кронам – N_c , к сумме пикселей сухих и здоровых крон в кадре N_Σ в данном кадре участка леса будет:

$$P = N_c / N_\Sigma = 45038 / 327680 = 0,137. \quad (1)$$

Нанесение вычисленных по формуле (1) количественных индексов на карту, составленную из множества отдельных кадров согласно геопривязки, позволяет получить тематическую обзорную карту с распределением «индекса здоровья леса» на исследованной с борта носителя площади лесного массива.

При классификации тем же методом обычных кадров RGB в видимом диапазоне сухие кроны не контрастируются с той же эффективностью, и картину искажает наличие подобных хвойных и лиственных пород леса, а также кустарника [3].



Рисунок 4 – Попытка классификации изображения видимого диапазона

В качестве примера на рисунке 4 показана попытка «классификации» кадра видеопривязки (камера видимого диапазона аппаратуры «Мультискан») соответствующего рисунку 1 тепловому ИК-кадру. Как видим, контрасты неясны и неоднозначны с точки зрения состояния лесного покрова и зависят от условий съемок, освещения, вида растительности и ее плотности.

Даже при попытках принудительного контрастирования кадра, представленного на рисунке 5, однозначного определения усохшей растительности по кадрам видимого диапазона спектра не наблюдается.

Прочие алгоритмы (например, К-средних), применённые к изображению в видимом диапазоне (рисунок 6), контрастируют лишь растительность с различным уровнем освещённости, различного типа (хвойные, лиственные, кустарники) и с различной структурой лиственного покрова.



Рисунок 5 – Контрастирование классифицированного изображения видимого диапазона

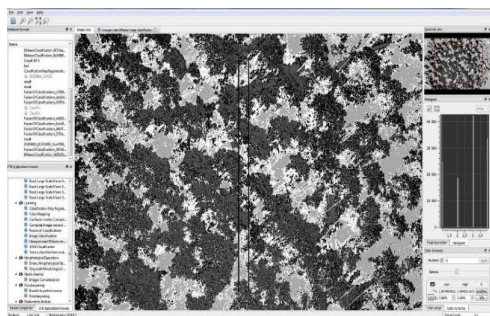


Рисунок 6 – Классификация по методу К-средних изображения видимого диапазона

Выводы. Работа в тепловом диапазоне для классификации и распознавания состояния леса эффективнее видимых диапазонов видеосъемки, которые более пригодны для выделения типов поверхности и видов растительности, а также весьма зависимы от условий освещения и погоды.

Проведение, помимо пространственных, временных и сезонных измерений состояния лесного массива (в одинаковых стадиях вегетации), позволяет определять динамику развития его

негативных либо позитивных изменений, а также эффективность предпринимаемых природоохранных мер. Особенно наглядно и практически целесообразно составление ежегодных карт по описанным «индексам усыхания леса».

Литература

1. Беляев Б.И. Авиационный модульный комплекс мультиспектральной съемки земной поверхности «Мультискан» / Б.И. Беляев, А.В. Домарацкий, П.В. Ивуть, П.В. Кучинский, Э.И. Нестерович, А.Д. Хомицевич, А.В. Чумаков // Приборостроение–2019. Материалы 12-й Международной научно-технической конференции, 13–15 ноября 2019 г. – Минск, БНТУ–С. 452–453.
2. Решение о выдаче патента по заявке № 20200157, МПК G01N 21/01. Устройство для авиакосмической мультиспектральной съемки / А.В. Чумаков и др. – Дата подачи заявки – 18.06.2020 г.
3. Давидович Ю.С. Распознавание усыханий древесной растительности на аэрокосмических снимках / Ю.С. Давидович, Л.В. Катковский // Материалы республиканского научно-практического семинара студентов и молодых ученых, 13 ноября 2019. – Минск, БГУ. – 2019.

УДК 620.179.14

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ 12X18N10T

Шарандо В.И., Чернышёв А.В., Кременькова Н.В.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

В настоящее время во многих отраслях машиностроения находят применение высоколегированные нержавеющие аустенитные стали. В исходном состоянии после закалки от температур 1 000–1 050 °С они имеют преобладающую парамагнитную γ -структуру, дополненную некоторым количеством ферромагнитной фазы, представленной δ -ферритом. Механико-термическая обработка таких сталей приводит к формированию в структуре новой ферромагнитной α -фазы – мартенсита [1–3]. При этом могут существенно изменяться эксплуатационные свойства изготовленных из этих материалов изделий, их контроль требует разработки и применения новых неразрушающих физических методов и методик.

В настоящей работе рассмотрена возможность применения для целей контроля структурных изменений в сталях аустенитного класса при их пластической деформации разработанных в Институте прикладной физики НАН Беларуси магнитодинамического толщиномера МТЦ-3, измерителя остаточной намагниченности ИОН-4 и прибора контроля твердости ПКТ-2. В качестве объекта контроля рассмотрена широко применяемая в промышленности сталь 12X18N10T.

Из стального листа толщиной 10 мм, находившегося в состоянии поставки (закалка от высоких температур), вырезаны плитки размером 21×21 мм². Затем путём многократной прокатки при комнатной температуре во взаимно перпендикулярных направлениях обеспечены различные величины их пластической деформации.

В исследованиях использован толщиномер МТЦ-3 [4, 5], основанный на регистрации изменения магнитного потока в индукционной катушке, охватывающей стержневой магнит, при его контакте и затем удалении от ферромагнетика. Энергия магнита, выполненного из $NdFeB$, составляет 45 мДж. С помощью измерителя остаточной намагниченности ИОН-4 [5], использующего устанавливаемую на поверхность ферромагнетика и затем удаляемую от него катушку без магнита, определялся поток индукции от магнитного пятна, оставленного магнитным наконечником преобразователя толщиномера МТЦ-3 после его удаления от контролируемой поверхности. При этом величина измеряемого сигнала характеризует остаточную намагниченность контролируемой структуры. Исследования при переменном магнитном поле возбуждения производились с помощью

прибора ПКТ-2 [6]. Измерялась амплитуда третьей гармонической составляющей U_3 выходной ЭДС накладного преобразователя. Она пропорциональна величине постоянной Релея β .

На рисунке 1 приведены в условных единицах зависимости показаний приборов МТЦ-3, ИОН-4 и ПКТ-2 от степени деформации образцов.

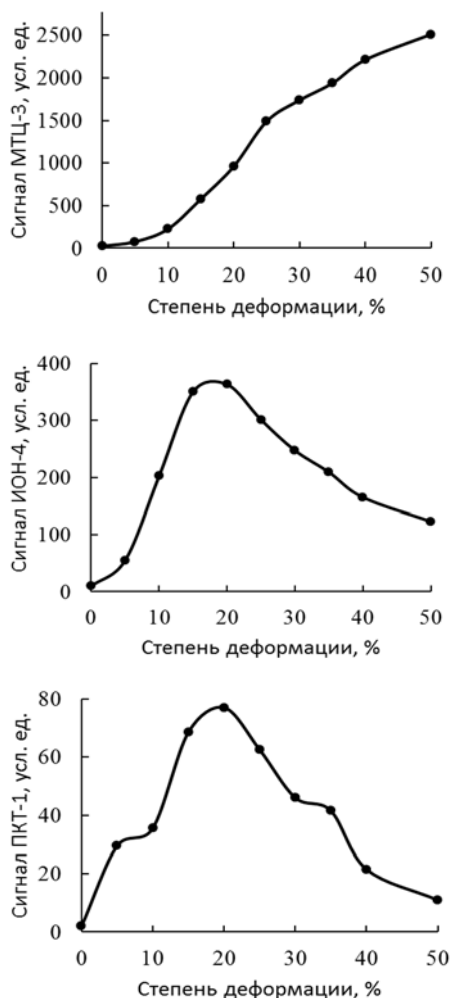


Рисунок 1 – Зависимости сигналов магнитодинамического толщиномера МТЦ-3, измерителя остаточной намагниченности ИОН-4 и прибора контроля твердости ПКТ-2 от степени деформации образцов из стали 12Х18Н10Т

Поскольку следствием прокатки было изменение от 10 до 5 мм толщины образцов (при сохранении их объема), оценено влияние на результаты измерений геометрического фактора. Ширина и глубина информативной зоны здесь должна быть намного большей, чем при работе с конструкционными сталями, вследствие меньшего количества и высокой разреженности ферромагнитной фазы. Эксперименты с наложением образцов друг на друга, действительно, показали существование этого эффекта при измерениях приборами МТЦ-3 и ИОН-4 на отдельных сла-

бомагнитных пластинках. В данном же конкретном случае было установлено, что ширина образцов вообще не сказывается на величине измеряемых сигналов, а уменьшение толщины может, вследствие одновременного быстрого нарастания количества и плотности магнитного материала, вызвать погрешности измерений не более 1 %. Для ПКТ-2 глубина информативной зоны не превышает нескольких сотен микрометров.

Кроме указанных исследований на всех образцах с помощью твердомера ТК-2М были выполнены измерения твердости. Полученные значения в единицах HRC показаны на рисунке 2.

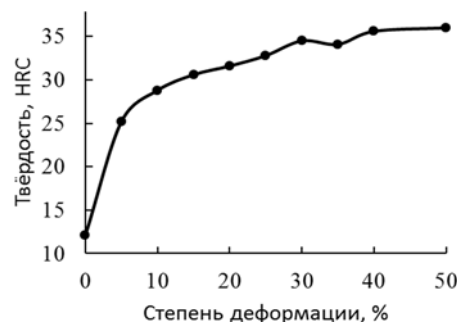


Рисунок 2 – Зависимость твердости по Роквеллу от степени деформации образцов из стали 12Х18Н10Т

Изменение сигнала МТЦ-3 указывает на непрерывный рост магнитного потока с увеличением степени деформации, что свидетельствует об интенсивном образовании магнитной фазы [1–3]; она может однозначно контролироваться с помощью данного прибора. Характерна неплохая корреляция полученной кривой с кривой изменения твердости (рисунок 2).

Измеряемая прибором ИОН-4 остаточная намагниченность ведёт себя более сложно: имеет ярко выраженный экстремум. Схожая зависимость от деформации величины коэрцитивной силы зафиксирована в работе [2]. Её авторы в качестве возможного объяснения этого эффекта рассматривают критерий энергетической выгоды образования конкурирующих однодоменных или многодоменных структур. В то же время снятая ими зависимость остаточной намагниченности от деформации такого перегиба не имеет. Поведение полученной нами кривой остаточной намагниченности можно связать с указанными в [2] факторами. Также следует учесть, что используемые нами приборы работают с расположенной у поверхности локальной информативной зоной; изменение количества и плотности магнитного материала в образце приводит к перераспределению её намагниченности за счёт замыкания на глубинные объёмы.

Поведение кривой, полученной с помощью прибора ПКТ-2, обусловлено тем, что амплитуда

U_3 прямо пропорциональна постоянной β , характеризующей нелинейные необратимые процессы намагничивания. Первоначальный рост U_3 при увеличении степени пластической деформации образца вызван формированием в нем ферромагнитной фазы. После достижения максимального значения U_3 переходит к снижению, так как с ростом степени пластической деформации начинает уменьшаться величина β .

Из полученных результатов следует, что контроль степени механической обработки, количества создаваемой ею ферромагнитной фазы, а также твердости изделий из стали 12X18H10T на технологически известных участках диапазона пластической деформации до и после 20 % может осуществляться с помощью любого из трёх рассмотренных приборов. При этом прибор контроля твердости ПКТ-2, создающий наименьший объем информативной зоны, применим к более мелким изделиям. Контроль во всем диапазоне деформаций 0–50 % возможен только с помощью магнитодинамического толщиномера МТЦ-3. Процесс измерений этим прибором характеризуется простотой, при этом обеспечивается высокая чувствительность и стабильность получаемых результатов.

УДК 678.07

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНОК НАНОКОМПОЗИТОВ И ПОЛИОКСИБУТИРАТА МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Ширяева В.Д.¹, Щербакова Е.Н.²

¹Институт химии новых материалов НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Магнитные наночастицы (НЧ) оксидов железа в составе композитов благодаря своим магнитным свойствам, таким как низкая коэрцитивность, высокая намагниченность насыщения и низкая температура Кюри, а также чрезвычайно низкая токсичность и биосовместимость, считаются одними из наиболее подходящих материалов для использования в медицине. В частности, композиты на их основе перспективны для биомедицинских применений в качестве инструмента для адресной доставки лекарств [1].

Пленки полиоксибутирата (ПОБ) используются в медицине для создания тканей, основанных на биоразлагаемых полимерах и имеющих форму замещаемого органа, для изготовления рассасывающихся шовных нитей, хирургических пластин, остеопротезов и имплантатов с возможностью постепенного замещения соединительной тканью организма [2, 3].

В настоящей работе для исследования образцов использовался метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе

Литература

1. Снежной Г.В. Идентификация низких содержания феррита и мартенсита в аустенитных хромоникелевых сталях // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 7. – С. 76–79.
2. Горкунов Э.С. Влияние деформации прокаткой и одноосным растяжением на структуру, магнитные и механические свойства армо-железа, стали 12X18H10T и составного материала «сталь 12X18H10T – армо-железо–сталь 12X18H10T» / Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Коковихин Е.А., Туева Е.А. (Путилова), Субачев Ю.В., Горулева Л.С., Подкорытова А.В. // *Дефектоскопия*. – 2011. – № 6. – С. 16–30.
3. Лухвич А.А. Выявление ферромагнитной составляющей в нержавеющей сталях магнитодинамическим методом. / А.А. Лухвич, В.И. Шарандо, А.К. Шукевич, К.И. Янушкевич // *Дефектоскопия*. – 2015. – № 3. – С. 3–10.
4. Лухвич А.А. Магнитные толщиномеры нового поколения // *Не разрушающий контроль и диагностика*. – 2010. – №4. – С. 3–15.
5. Разработки лаборатории металлофизики ИПФ НАН Беларуси в области неразрушающего контроля [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://iaph.basnet.by/lab1/products/> – Дата доступа: 07.10.2020.
6. Гусак Н.О. Прибор для контроля твердости ПКТ-2 / Н.О. Гусак, А.В. Чернышев, В.Л. Цукерман // *Дефектоскопия*. – 1991. – № 10. – С. 92.

JSM6000 (JEOL, Япония). Изображения СЭМ получены в режиме высокого вакуума при ускоряющем напряжении 15 кВ.

Сканирующая электронная микроскопия широко используется для диагностики наноматериалов и наноструктур, так предел разрешения СЭМ приближается к нескольким нанометрам. Кроме того, с помощью АСМ определяют химический состав приповерхностной области. Достоинством СЭМ является возможность определения количественного и качественного химического состава образца.

Пленки ПОБ получали нанесением раствора полиоксибутирата в хлороформе методом спинкоутинга – это метод нанесения частиц или тонких пленок на плоские подложки за счет центрифугирования и растекания раствора прекурсора по поверхности образца.

Нанесение осуществлялось на 2 вида шаблонов: линейный и квадратный. Результаты исследований на СЭМ представлены на рисунках 1 и 2 соответственно.

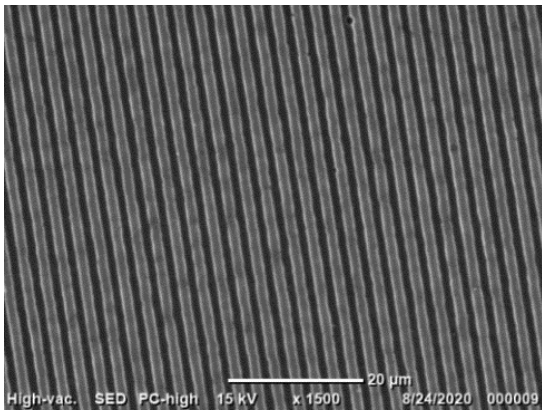


Рисунок 1 – Линейная морфология пленок ПОБ, полученная с помощью СЭМ

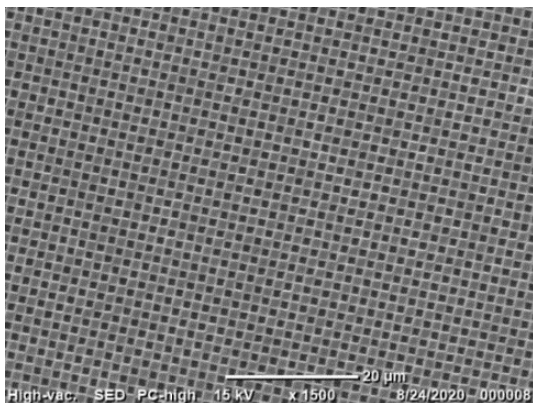


Рисунок 2 – Квадратная морфология пленок ПОБ, полученная с помощью СЭМ

В ходе выполнения исследований была получена морфология нанокompозита на основе ядра из гидроксипатита и магнетита, покрытого полиальдегиддекстраном, амидом и серебром – $[(\text{ГА})\text{Fe}_3\text{O}_4]\text{ПАД-466}\text{Ag}$ (рисунок 3).

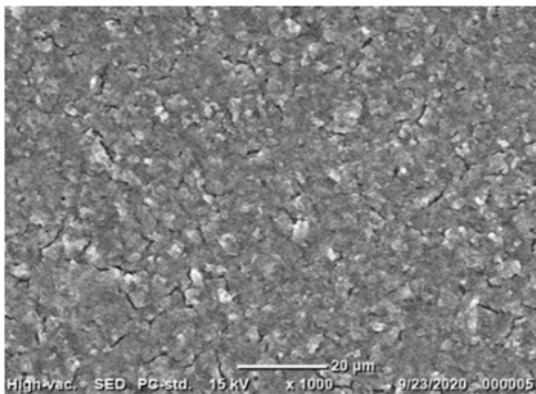


Рисунок 3 – Морфология нанокompозита на основе ядра из гидроксипатита и магнетита, покрытого полиальдегиддекстраном, амидом и серебром

Данный нанокompозит был получен осаждением из суспензии на Si-подложку и затем высушен при $T = 20^\circ\text{C}$.

С помощью СЭМ был также проведен анализ элементного состава. Предварительно были вы-

браны интересующие нас элементы из таблицы Менделеева. Осуществлялись 3 варианта анализа: по всему изображению (рисунок 4), по выбранной области (рисунок 5) и в выбранной точке (рисунок 6).

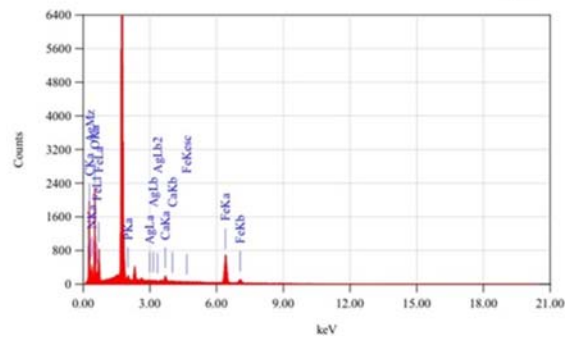
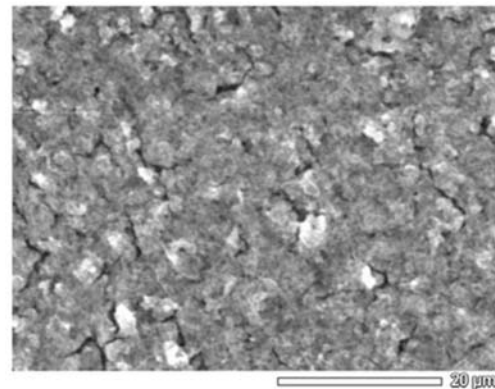


Рисунок 4 – Анализ элементного состава нанокompозита по всей области

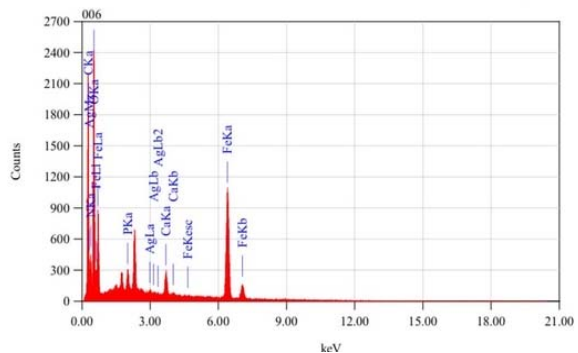
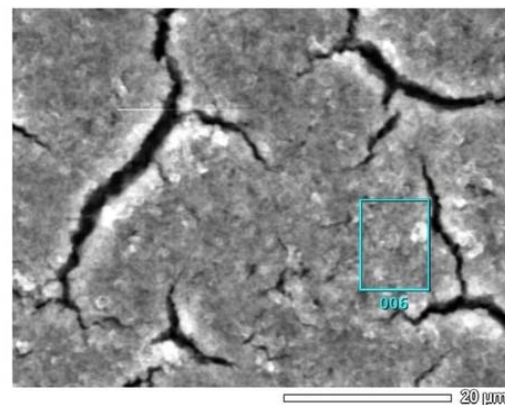


Рисунок 5 – Анализ элементного состава нанокompозита по выбранной области

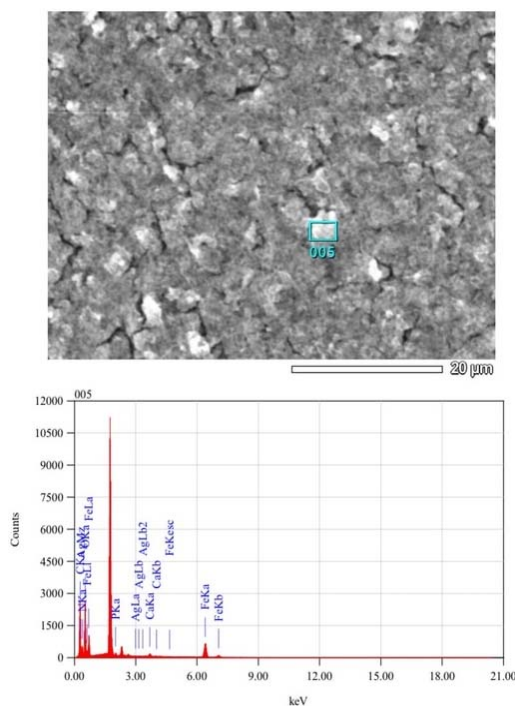


Рисунок 6 – Анализ элементного состава нанокompозита в выбранной точке

Во всех трех случаях были выбраны и обнаружены C, N, O, P, Ca, Fe и Ag. В качестве подложки использовался Si, вследствие чего на

спектрах наблюдается большой пик, который определяет его наличие.

Таким образом, в ходе выполнения работы с помощью СЭМ JSM6000 были исследованы пленки полиоксибутирата и нанокompозита на основе ядра из гидроксиапатита и магнетита, покрытого полиальдегиддекстраном, амидом и серебром. Изучены морфология поверхности и проведен качественный анализ элементного состава нанокompозита.

Исследования полиоксибутирата и нанокompозита на основе ядра из гидроксиапатита и магнетита являются актуальными, так как данные материалы находят широкое применение в медицине.

Литература

1. Игнатович Ж.В. Синтез и свойства композитов на основе гидроксиапатита, магнетита и 2-ариламинопиримидина / Ж.В. Игнатович, Х.А. Новик, А.В. Абакшенок [и др.] // Российские нанотехнологии. – 2019. – Т. 14, № 11–12. – С. 88–94.
2. Boskhomdzhiiev A.P. Biodegradation kinetics of poly(3-hydroxybutyrate)-based biopolymer systems / A.P. Boskhomdzhiiev, A.P. Bonartsev, T.K. Makhina [et al.] // Biochem. Suppl. Ser. B Biomed. Chem. – 2010. – Vol. 4, no. 2. – Pp. 177–183.
3. Langer R. Tissue Engineering / R. Langer, J.P. Vacanti // Science, New Series. – 1993. – V. 260(5110). – P. 920–926.

УДК 678.07

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНOK ПОЛИОКСИБУТИРАТА МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Ширяева В.Д.¹, Щербакoва Е.Н.²

¹Институт химии новых материалов НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Полиоксибутират (ПОБ) и его сополимеры являются наиболее известными и широко используемыми представителями полиоксиалканатов. Благодаря комплексу физико-химических и биологических свойств – способности к биодеградации, биологической инертности и совместимости с тканями, ПОБ может быть использован для изготовления рассасывающихся шовных нитей, хирургических пластин, остеопротезов и имплантатов с возможностью постепенного замещения соединительной тканью организма [1].

В настоящей работе для исследования образцов ПОБ использовался метод атомно-силовой микроскопии (АСМ) с использованием сканирующего зондового микроскопа Nanoscope III D (Veeco, США).

Условия сканирования АСМ: контактный режим, кантилевер из нитрида кремния с констан-

той жесткости 0,32 Н/м, скорость сканирования: 1–5 Гц, опорное значение силы взаимодействия: 1–10 нН, плотность информации составляла 512×512 точек.

Пленки из ПОБ можно получить 2 способами:

- из раствора полиоксибутирата в хлороформе методом спин-коутинга – метод нанесения частиц или тонких пленок на плоские подложки за счет центрифугирования и растекания раствора прекурсора по поверхности образца.

- методом осаждения из 3 % раствора полимеров в хлороформе на стеклянную чашку Петри. После испарения хлороформа, оставшийся в пленках растворитель удаляют путем сушки в термостате при 37 °С в течение двух дней.

Эти пленки могут применяться в качестве подложек для роста клеток.

Пленки ПОБ получали нанесением раствора полимера на 2 вида шаблонов: линейный и квад-

ратный. После его высыхания получилась линейная (рисунок 1) и квадратная (рисунок 2) морфология соответственно.

Данные пленки могут применяться в медицине. Особенно актуально внедрение этих пленок в область тканевой инженерии. Одно из направлений тканевой инженерии – создание новой функциональной ткани, основанной на биоразлагаемых полимерах и имеющей форму замещаемого органа. Для этого сначала отбирают биополимер с заданными характеристиками, а также взятые по возможности клетки у того же организма, у которого планируется замещение органа. Клетки начинают делиться и вторгаются в биополимерную матрицу, в то же время биополимер постепенно подвергается биодеструкции. Как только процесс биодеструкции завершается, функциональная ткань остается в форме замещаемого органа [2].

Матричные биополимеры для разработки этой системы должны обладать определенными фундаментальными свойствами. Требуется биосовместимый материал, имеющий соответствующие механические свойства, для того чтобы поддерживать клеточную адгезию и быстрый рост клеток, а также организовывать рост клеток в необходимом направлении, позволяющим растущей ткани получать питательные вещества [3].

В настоящее время саморассасывающиеся хирургические нити являются в большинстве сделанными из биodeградирующих полимеров. В медицине также используются ортопедические фиксирующие устройства, хирургические заплатки и другие медицинские изделия, в том числе трехмерные пористые носители для реконструкции тканей, сделанные из биоразрушаемых полимеров [4].

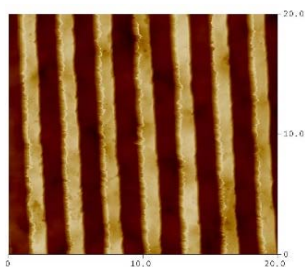


Рисунок 1 – Линейная морфология пленок ПОБ

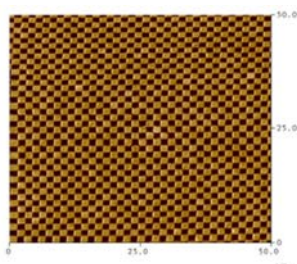


Рисунок 2 – Квадратная морфология пленок ПОБ

Кроме исследования морфологии поверхности пленок ПОБ была определена также толщина полученных пленок.

При исследованиях с помощью функции «Section Analysis» (анализ сечения) получили значения толщины пленки, равное 517 нм для линейной пленки (рисунок 3) и 506 нм для квадратной (рисунок 4).

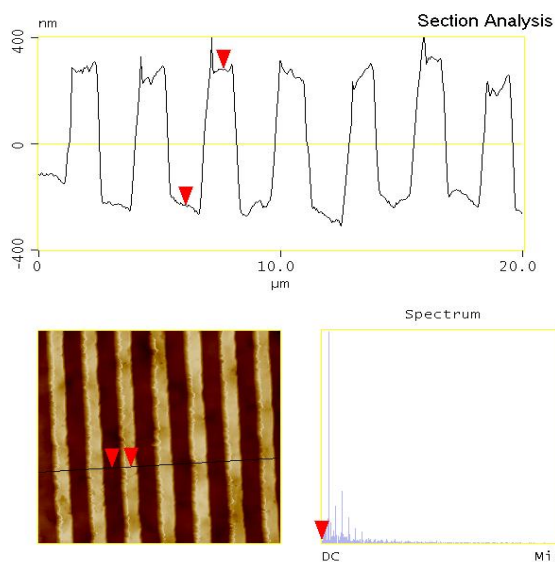


Рисунок 3 – Анализ сечения для линейной пленки ПОБ

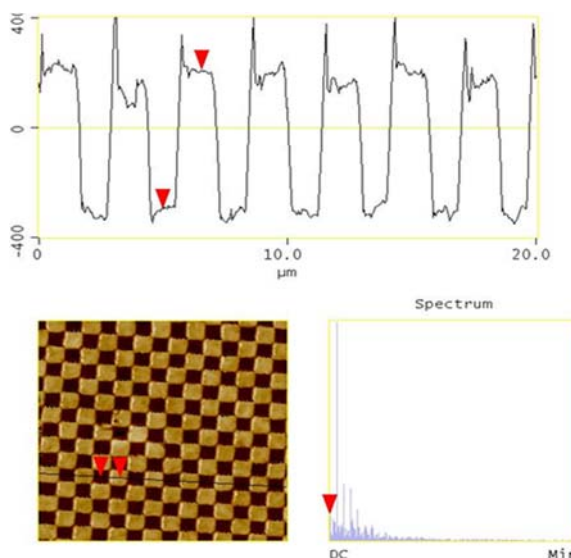


Рисунок 4 – Анализ сечения для квадратной пленки ПОБ

Исследования деградации полиоксидиурата с помощью метода атомно-силовой микроскопии (АСМ) вызывают особый интерес. Одно из важных преимуществ АСМ перед другими методами микроскопии состоит в том, что данный метод позволяет проводить наблюдения в жидкости. В биологии это часто используется, например, для работы с живыми клетками [5].

Использование АСМ позволяет визуализировать процессы разложения пленок в реальном времени.

Таким образом, в ходе выполнения работы с помощью сканирующего зондового микроскопа Nanoscope IIIA изучена морфология поверхности пленок полиоксидбутирата и измерена их толщина.

Литература

1. Boskhomdzhiev A.P. Biodegradation kinetics of poly(3-hydroxybutyrate)-based biopolymer systems / A.P. Boskhomdzhiev, A.P. Bonartsev, T.K. Makhina [et al.] // Biochem. Suppl. Ser. B Biomed. Chem. – 2010. – Vol. 4, no. 2 – Pp. 177–183.

2. Langer R. Tissue Engineering / R. Langer, J.P. Vacanti // Science, New Series. – 1993. – Vol. 260(5110). – P. 920–926.

3. Hutmacher D.W. Scaffold design and fabrication technologies for engineering tissues – state of the art and future perspectives // J. Biomater. Sci. Polym. Ed. – 2001. – Vol. 12(1). – P. 107–124.

4. Williams J.M. Bone tissue engineering using polycaprolactone scaffolds fabricated via selective laser sintering / J.M. Williams, A. Adewunmi, R.M. Schek // Biomaterials. – 2005. – Vol. 26(23). – P. 4817–4827.

5. Efremov Y.M. Atomic force microscopy of living and fixed *Xenopus laevis* embryos // Micron. – 2011. – No. 8 (42). – Pp. 840–852.

УДК 621.3

ИССЛЕДОВАНИЯ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ НАТУРАЛЬНОЙ КОЖИ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Анисович А.Г.¹, Маркевич М.И.¹, Журавлева В.И.², Щербакова Е.Н.³, Шаповалов С.В.⁴

¹ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»

Минск, Республика Беларусь

²Военная академия Республики Беларусь

Минск, Республика Беларусь

³Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

⁴СООО «Белвест»

Витебск, Республика Беларусь

Для производства обуви используются как натуральная кожа, так и различные синтетические материалы. Многие производители качественной обуви по-прежнему выбирают натуральную кожу. Это обусловлено, прежде всего, ее высокой прочностью, износостойкостью, безопасностью. Благодаря наличию микропор в натуральной коже она обладает хорошей воздухопроницаемостью, что, в том числе, ценится потребителями. В искусственной коже могут присутствовать химические пропитки и красители, которые могут выступать сильными аллергенами. Поэтому спрос на изделия из натуральной кожи остается высоким.

Применение лазерной технологии для раскроя натуральной кожи создает возможности повышения рентабельности предприятия по изготовлению обуви за счет повышения скорости резки, вырезки деталей сложной формы, высокой точности выполнения операций. Кроме того, лазерная резка позволяет выполнение на поверхности кожи мелких декоративных деталей и гравировки. Однако ввиду пористости натуральной кожи существуют и проблемные вопросы, в частности процесс горения при воздействии лазерного луча, а также остатки материала внутри отверстия из-за нечеткой проработки отверстия при данных режимах. Поэтому необходимо оптимизировать режимы лазерной обработки натуральной кожи [1–4].

Цель работы – исследование морфологии поверхности натуральной кожи в процессе лазерно-

го воздействия с целью оптимизации режимов. Процесс вырезания необходимых отверстий производился на промышленном лазерном комплексе Flexi 600. Данный комплекс создан на базе CO₂ лазерного источника Rofin Sygar (Германия) и предназначен для высокоскоростной резки, маркировки и гравировки различных материалов.

Исследование морфологии поверхности производилось с использованием оптического микроскопа Микро-200. При светлоспольном освещении не удастся получить изображение требуемой контрастности и цветности, поскольку поверхность натуральной кожи не является полностью плоской. Поэтому для исследования поверхности применялся режим освещения по методу темного поля [5].

Данный способ освещения позволяет получить изображение от неплоскостных участков объекта при сохранении натурального цвета фрагментов изображения.

На рисунке 1 представлена морфология поверхности натуральной кожи при режимах: мощность P = 135 Вт, скорость сканирования составляла V = 600 мм/с, частота ν = 5,0 кГц. Обработка лазером производилась со стороны лицевой поверхности обувной заготовки.

Принцип формирования изображения при использовании темного поля предполагает освещение объекта полым конусом света; при этом только наклонные участки объекта являются освещенными. Темнопольная микроскопия основана на рассеивании света микроскопическими

объектами, в том числе теми, размеры которых меньше предела разрешения светового микроскопа. Свет проходит через темнопольный конденсор, который формирует световой пучок в виде полого конуса и направляет его на объект наблюдения. Изображение формируется при помощи небольшой части лучей, рассеянных микрочастицами объекта наблюдения внутри конуса и прошедшими через объектив.

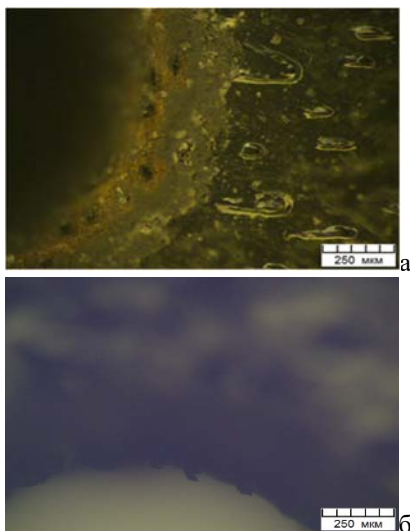


Рисунок 1 – Морфология поверхности фрагмента края отверстия натуральной кожи после лазерной перфорации при частоте 5 кГц:

а – лицевая сторона, *б* – обратная сторона

В поле зрения на тёмном фоне видны светлые изображения элементов структуры объекта, отличающиеся от окружающей среды показателем преломления.

Из анализа рисунка 1 следует, что поверхность образца существенно неоднородна, имеется значительная пористость, в порах содержится кислород, поддерживающий горение материала в процессе лазерной перфорации. После перфорации с частотой 5 кГц зона воздействия лазера составляет порядка 330 мкм (рисунок 1, *а*). Зона горения располагается в виде ободка шириной порядка 100 мкм по всему периметру отверстия. Применение частоты 5 кГц не создает ровного края у отверстия (рисунок 1, *б*); перфорированный край имеет значительные неровности от 25 до 50 мкм.

При уменьшении частоты лазерного воздействия сплошная зона горения не формируется. После осуществления перфорации с частотой 3,5 кГц наблюдаются отдельные фрагменты сгоревшего кожного материала; размер зоны влияния сужается (рисунок 2).

При снижении частоты лазерного воздействия до 2,5 кГц продукты горения распределены вокруг отверстия; размер зоны влияния составляет при данном режиме 250 мкм (рисунок 3).

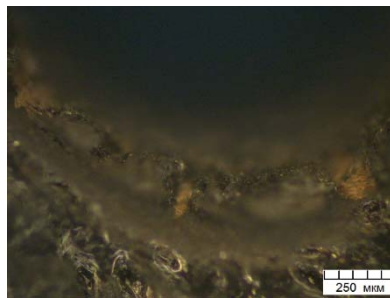


Рисунок 2 – Морфология поверхности фрагмента края отверстия натуральной кожи после лазерной перфорации при частоте 3,5 кГц

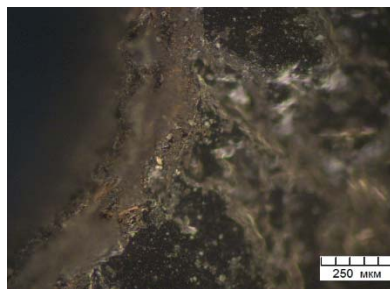


Рисунок 3 – Морфология поверхности фрагмента края отверстия натуральной кожи после лазерной перфорации при частоте 2,5 кГц

Таким образом, в ходе работы с помощью оптического микроскопа при темнопольном освещении изучены изменения морфологии поверхности натуральной кожи после лазерного облучения при мощности $P = 135$ Вт и скорости сканирования 600 мм/с при частотах $\nu = 5,0, 3,5$ и 2,5 кГц, в результате проведенных исследований установлены оптимальные режимы лазерной обработки натуральной кожи.

Литература

1. Kodirov T.J. Researches of Morphological Structure, Element Composition And Natural Leather Adsorption By Exposure to Laser Radiation / T.J. Kodirov, M.I. Markevich, A.N. Malyshko [et.al.] // International Journal of Resent Technology and Engineering. – 2020. – Vol.8, iss. 6. – P. 4880–4884.
2. Кодиров Т.Ж. Особенности лазерного воздействия в процессе антисептической обработки натуральной кожи / Т.Ж. Кодиров, Н.А. Содиков, А.П. Ласковнев [и др.] // Электроника плюс. – 2020. – № 2. – С. 47–50.
3. Кодиров Т.Ж. Морфология поверхности и экспресс-диагностика магниторезонансных свойств образца натуральной кожи после лазерного воздействия / Т.Ж. Кодиров, А.П. Ласковнев, М.И. Маркевич [и др.] // Электроника плюс. – 2020. – № 2. – С. 55–58.
4. Адашкевич С.В. Магниторезонансная диагностика радиопоглощающих композиционных материалов/ С.В. Адашкевич, В.Ф. Стельмах, А.Г. Бакаев [и др.] // Полимерные материалы и технологии. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 71–75.
5. Анисович А.Г. Искусство металлографии: использование методов оптического контрастирования А.Г. Анисович // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн.наук. – 2016. – № 1. – С. 36–42.

УДК 658.562

САМООЦЕНКА В ОДО «АКВАЭКОЛОГИЯ»
Спесивцева Ю.Б., Клевец О.С., Коншина Д.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

ОДО «Акваэкология» – частная компания, сфера деятельности которой: внедрение ресурсосберегающих инженерных решений в промышленности, энергетике и коммунальном хозяйстве: насосные станции и сети водоснабжения и канализации; очистные сооружения, теплогенерирующие и электрогенерирующие комплексы и др. СМК организации результативна, но уровень заказов сократился, для анализа причин принято решение провести процедуру самооценки, приняв за основу критерии бизнес-модели Тито Конти [1] и метод анкетирования.

1 этап: формирование экспертной группы. Руководитель – директор организации. Члены – руководители структурных подразделений. Требования к квалификации экспертов: наличие профессиональных знаний и опыта.

2 этап: выбор критериев. Самооценка проводится в трех областях, включающих в себя критерии: системные факторы (лидерство, стратегии и планы, человеческие ресурсы, организационные архитектуры), процессы и результаты (результаты бизнеса, удовлетворенность потребителей, персонала и партнеров, воздействие на общество).

3 этап: разработка опросных листов. Опросный лист – метод исследования, предусматривающий письменные ответы на систему поставленных вопросов, каждый из которых связан с центральной задачей исследования.

Весь персонал организации разделили на две категории: руководство и сотрудники, выступающие в роли исполнителей.

Для обработки результатов использовали четырех балльную оценочную шкалу: 0 – не соответствует действительности, 5 – затрудняюсь ответить, 10 – частично соответствует действительности, 15 – полностью соответствует действительности.

Для каждого критерия назначили весовой коэффициент для определения приоритетов организации в направлении улучшения. В каждой из трех областей весовой коэффициент равен 1. Весовые коэффициенты умножаются на баллы соответствующего критерия, полученные в процессе оценки (рисунок 1). Ниже приводятся некоторые вопросы анкеты.

Критерий 1. Лидерство

1а. Высшее руководство стремится, что бы сотрудники знали о целях, на достижение которых направлены усилия, и тратят время на разъяснения? 1б. Руководители организации обеспе-

чивают обратную связь с персоналом для улучшения своей деятельности?

Критерий 2. Стратегия и планы

2а. Руководство анализирует внешнюю информацию о имидже организации? 2б. Проводятся мероприятия по улучшению в организации?

Критерий 3. Человеческие ресурсы

3а. В организации существуют механизмы мотивации, вовлечения и поощрения персонала за деятельность по улучшению качества? 3б. В организации существует возможность к подготовке и повышению квалификации персонала?

Критерий 4. Организационные архитектуры

4а. Внедрены ли основные процессы финансового менеджмента на всех уровнях организации? 4б. Организация рационально использует свои ресурсы?

Критерий 5. Процессы

5а. Оценивается ли результативность и осуществляется ли улучшение процессов в организации? 5б. Осуществляется ли учет требований потребителей при разработке и ремонту изделий, и оказания услуг?

Критерий 6. Результаты бизнеса

6а. Результаты показывают постоянное улучшение деятельности? 6б. Финансовая деятельность предприятия имеет положительную динамику?

Критерий 7. Удовлетворенность потребителей.

7а. Качество продукции и услуг соответствует ожиданию? 7б. Все претензии рассматриваются быстро и внимательно?

Критерий 8. Удовлетворенность персонала

8а. Сотрудники удовлетворены переменами, происходящими в организации? 8б. Сотрудники удовлетворены механизмом мотивации и поощрения?

Критерий 9. Удовлетворенность партнеров

9а. Организация выполняет все условия договорных отношений? 9б. Организация удовлетворяет потребности и ожидания партнеров?

Критерий 10. Результаты для общества

10б. Учитываются ли организацией интересы общества? 10с. Общество положительно воспринимает деятельность предприятия?

Анкета была предоставлена 20 сотрудникам предприятия (6 сотрудников занимают руководящие должности). Оценки по каждому критерию вносят в оценочный лист. Для удобства восприятия полученной информации построена лепестковая диаграмма: синий цвет – оценка

руководителей, красный цвет – оценка исполнителей (рисунок 2).

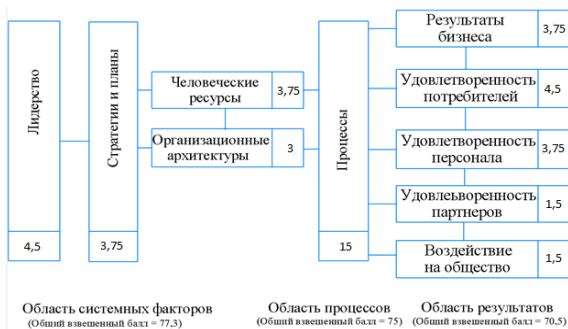


Рисунок 1 – Максимально взвешенные баллы

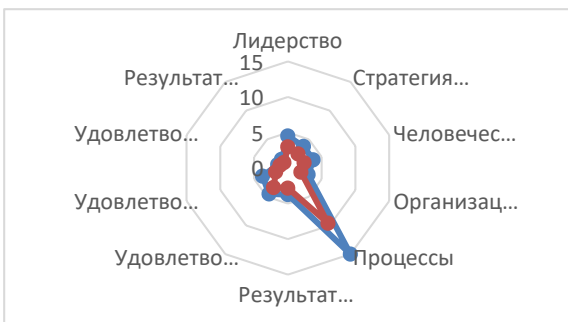


Рисунок 2 – Лепестковая диаграмма

Самые низкие показатели по итогу самооценки организации получил критерий удовлетворенность персонала.

Такая система оценки позволяет сопоставить мнения руководителей и работников организации. На основании средних оценок сотрудников $I_{рук}$ и $I_{раб}$ вычисляется коэффициент адекватности менеджмента K_{AM} (15 – максимально возможная оценка):

$$K_{AM} = \frac{I_{рук} - I_{раб}}{15}$$

Коэффициент согласия в коллективе $K_{СК}$ позволяет определить полярность оценок опрашиваемых работников n по каждому показателю (i - номер вопроса):

$$K_{СК} = \frac{n \sum (I_{раб.i})^2 - (\sum I_{раб.i})^2}{n^2}$$

Если коэффициент $K_{СК}$ находится в диапазоне от 0 до 1 можно говорить о единстве мнений сотрудников и эти направления наиболее перспективны для улучшений. По критериям, где $K_{СК}$ больше единицы необходимо выявить причины разногласий для того, чтобы планы улучшений удовлетворяли всех сотрудников, иначе результативность изменений не будет высокой.

Матрица возможности улучшений (по вертикали – K_{AM} , по горизонтали – $K_{СК}$) прогнозирует

эффективность изменений в различных областях (рисунок 3).

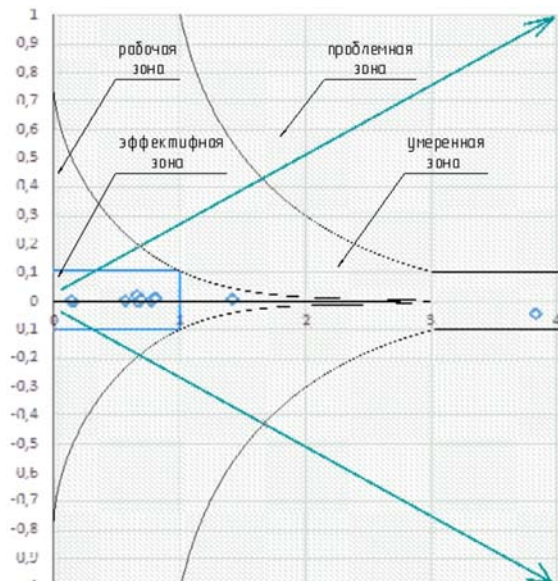


Рисунок 3 – Матрица возможности улучшений

Возможность улучшений определяется зонами, в которые попадают критерии:

1. Эффективная – максимальный эффект от программы улучшений.
2. Рабочая – большая вероятность хорошей результативности.
3. Умеренная – необходим анализ значений коэффициентов K_{AM} и $K_{СК}$ и тщательная подготовка программы улучшений.
4. Проблемная – анализ и устранение причин неудовлетворительных значений коэффициентов K_{AM} и $K_{СК}$.

Рекомендации по улучшению:

- систематичность самооценки;
- обеспечение обратной связи с персоналом;
- анализ возможностей основных видов деятельности организации;
- постоянный контроль управления процессами;
- совершенствование методики оценки результативность процессов;
- учет требований потребителей при разработке и ремонту изделий, и оказании услуг.
- внедрение методики оценки удовлетворенности персонала;
- повышение квалификации работников;
- пересмотр коллективного договора;
- закупка новые инструментов и приборов.

Литература

1. Конти Т. Самооценка в организациях / Тито Конти. – М.: «Стандарты и качество», 2000. – 328 с.

УДК 621.3

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ЛУКОМЛЬСКОЙ ГРЭС

Спесивцева Ю.Б., Надеждин О.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Зависимость белорусской энергетики от внешних поставок энергоресурсов и их высокая стоимость изменила отношение к организации измерений и учета электроэнергии на всех технологических стадиях его производства и потребления. Концепция нового приборного учета основывается на принципах автоматизированного энергоучета и, в частности, на понятии автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ).

Достоверные и оперативные данные по работе электрооборудования и расходу электроэнергии, расходуемой на собственные нужды (СН), позволят принимать грамотные решения при оптимизации режима работы ТЭЦ.

Расход электроэнергии на собственные нужды Лукомльской ГРЭС значительно изменяется в течении года, причем нельзя однозначно утверждать, что эти колебания носят только сезонный характер и зависят от общей выработки электроэнергии. Существуют значительные резервы по снижению расхода путем оптимизации работы основных агрегатов и механизмов, но современный уровень организации технического учета не позволяет провести более детальный анализ потребляемой электроэнергии.

Собственные нужды ЛГРЭС обеспечивают: рабочие трансформаторы собственных нужд мощностью 25 МВА, резервные трансформаторы собственных нужд, комплексные распределительные устройства (ячейки КРУ) – 6 кВ. Основную нагрузку секций КРУ составляют электродвигатели котельных агрегатов, электродвигатели, обеспечивающие работу турбин, а также общестанционная нагрузка. Учет электроэнергии осуществляется по присоединениям к секциям КРУ.

В состав измерительного канала действующей системы учета электроэнергии расходуемой на собственные нужды входят: измерительные трансформаторы тока (ТТ), измерительные трансформаторы напряжения (ТН), индукционные счетчики электрической энергии, вспомогательные устройства.

«Устаревший» приборный учет электроэнергии, основанный на базе территориально рассредоточенных индукционных электросчетчиков с эпизодическим визуальным съемом и ручной обработкой показаний, не позволяет получать достоверные и оперативные данные учета, а также решать задачи оптимизации выработки и потребления электроэнергии. Экономически целе-

сообразно модернизировать систему учета электроэнергии СН до уровня автоматизированной.

Типовая структура АСКУЭ содержит три уровня:

1) измерительные каналы (измерительные трансформаторы тока, измерительные трансформаторы напряжения, электронные счетчики);

2) устройства сбора и передачи данных (УСПД), осуществляющие круглосуточный сбор измерительных данных с территориально распределенных ИК, накопление, обработку и передачу этих данных на верхние уровни;

3) сервер центра сбора и обработки данных со специализированным программным обеспечением.

До начала проектирования структурной схемы АСКУЭ проанализированы погрешности измерительного канала.

Погрешности измерительных трансформаторов тока токовая и угловая нормированы ГОСТ 7746-98. Токовая погрешность ТТ δ_I (рисунок 1) соответствует номинальному числовому значению класса точности лишь в диапазоне рабочего тока (50–120) % I_1 .

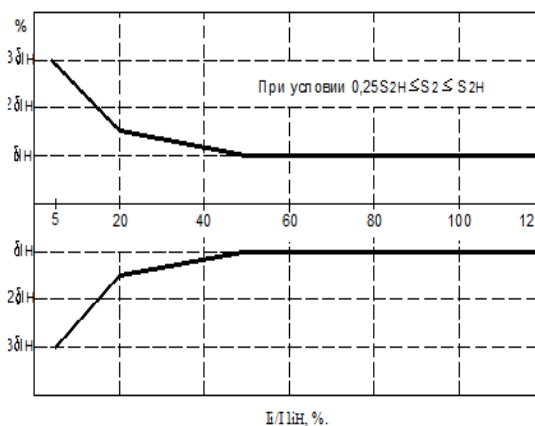


Рисунок 1 – Зависимость токовой погрешности $\delta_I, \%$ ТТ от рабочего первичного тока I_1

При уменьшении рабочего тока от 50 % до 20 % токовая погрешность увеличивается в 1,5, а при дальнейшем снижении рабочего тока до 5 % погрешность увеличивается до 3 раз.

Угловая погрешность фактически для всех типов трансформаторов тока располагается в области положительных значений и имеет характер, аналогичный зависимости токовой погрешности, но с положительным знаком.

На рисунке 2 приведены зависимости токовой погрешности ТТ типа ТОЛ 10-1 класса точности

0,5 в нормируемом ГОСТ 7746-98 диапазоне вторичной нагрузки ТТ 0,25 % до номинала, а также при двухкратном и пятикратном превышении. Зависимости получены экспериментальным путем.

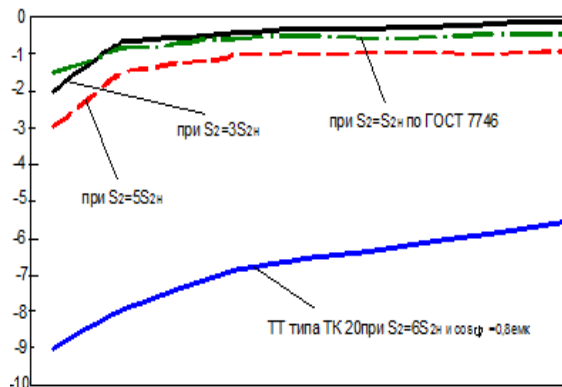


Рисунок 2 – Зависимость токовой погрешности δ_i , % ТТ от рабочего первичного тока I_1 при перегрузке вторичной цепи ТТ в 3, 5 и 6 раз

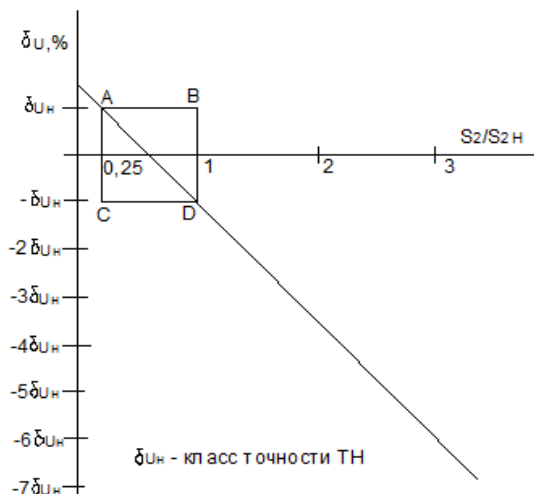


Рисунок 3 – Зависимость погрешности ТН от мощности нагрузки во вторичной цепи

Из графика видно, что токовая погрешность резко увеличивается при перегруженной вторичной цепи. Для обеспечения более достоверного расчета погрешности измерительного канала необходимо определить значение нагрузки во вторичной цепи ТТ, а также определить токовую и угловую погрешность ТТ при фактической вторичной нагрузке ТТ. В зависимости от полученных результатов следует принимать решение о возможности дальнейшего использования ТТ с его фактической вторичной нагрузкой или разгружать вторичную цепь ТТ вплоть до замены ТТ.

Погрешности измерительных ТН нормируют ГОСТ 1983-2001 в зависимости от мощности нагрузки S_2 вторичной цепи ТН (рисунок 3). В области АВСД, погрешность напряжения должна укладываться в допускаемые пределы. Например, для ТН класса точности 0,5 в указанном диапазоне мощности нагрузки ТН погрешность напряжения не должна превышать $\pm 0,5\%$. Однако на энергообъектах достаточно часто наблюдаются нарушения требований и ТН, как правило, перегружены.

Для обеспечения более достоверного расчета погрешности измерительного канала технологическим путем необходимо определить значение мощности нагрузки во вторичной цепи ТН, определить погрешность напряжения ТН при фактической мощности нагрузки ТН.

Погрешность из-за потерь напряжения в линиях соединения счетчиков с ТН для технического учета электроэнергии $< 1,5\%$. Эта погрешность во многих случаях может превышать нормируемые Правилами устройства электроустановок пределы. Причинами могут являться «слабые» по сечению и/или достаточно длинные провода в линии, повышенный ток на отдельных участках линий, появление микроокислов в контактных соединениях линий.

Основным источником суммарной погрешности измерений электроэнергии при использовании индукционных счетчиков, как правило, является погрешность счетчиков. Погрешность подавляющего большинства индукционных счетчиков, выходит за допустимый предел класса точности в течение ближайших 2–3 лет после их выпуска из производства. При дальнейшей эксплуатации счетчиков их погрешность продолжает увеличиваться. Для снижения метрологических потерь необходимо произвести замену индукционных счетчиков на электронные; провести анализ условий работы счетчиков и сделать правильный выбор счетчиков, нечувствительных к влиянию внешних величин; устранить источники дополнительных погрешностей. Можно использовать многофункциональный многотарифный счетчик электрической энергии «Гран-Электро СС-301» отечественного производителя.

АСКУЭ позволяет автоматизировать сбор и ведение базы данных учета электроэнергии, осуществлять оперативный контроль за работой, состоянием оборудования и средств измерений, уменьшить непроизводительные потери электроэнергии в виде неэкономичных режимов работы, вводить поправки, компенсирующие погрешность от влияющих факторов.

УДК 621.791

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС МЕТОДОВ ЭКСПЕРТНОГО ОЦЕНИВАНИЯ КАК МЕТОДИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПРОДУКЦИИ

Воронова Т.С., Рудницкий Ф.И., Романчак В.М., Рудая А.Н.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Ключевым этапом жизненного цикла инновационной продукции является процесс проектирования и разработки, в рамках которого формируется оптимальный комплекс функциональных характеристик. Спецификой данного процесса в первую очередь является изначально низкая информативность объекта разработки и невозможность применения метода аналогов и прецедентов. Априорное отсутствие необходимого количества информации соответственно порождает риски не достижения оптимальных характеристик исследуемого объекта инноваций, его неготовности к внедрению и практической реализации.

Очевидным способом снижения рисков является включение в процесс проектирования и разработки большого количества исследований, в том числе, экспериментальных, что делает его достаточно затратным. Значительные расходы временных, финансовых и материально-технических ресурсов снижают ценность результатов исследований. Разработчик вынужден сворачивать комплексные исследования и принимать неоптимальные решения на основании неполного массива информации, что, в свою очередь ведет к повышению рисков принятия некорректных решений.

С подобной проблемой столкнулась исследовательская группа, реализующая проект разработки технологии литья заготовок из быстрорежущего сплава режущих вставок ротора горнодобывающего комбайна, предназначенного для добычи калийной соли на Солигорском калийном комбинате.

Традиционно для изготовления подобного рода изделий применяются другие методы получения заготовок: прокат, порошковое спекание твердых сплавов и др.

Два аспекта были приняты во внимание руководством Солигорского калийного комбината при выборе технологии литья для получения заготовок резцов фрез.

Первый аспект связан с требуемыми эксплуатационными характеристиками резцов. Условия резания рудной породы, режим работы ротора комбайна требуют наличия высокой износостойкости инструмента и удовлетворительной ударной прочности. Этот комплекс эксплуатационных характеристик не обеспечивается традиционными способами получения заготовок. Технологии проката, порошкового спекания твердых сплавов обеспечивают усредненные

эксплуатационные характеристики как в части износостойкости, так и ударной вязкости. В то время, как технологии литья позволяют более гибко управлять процессом и теоретически обеспечить любое сочетание эксплуатационных свойств резца.



Рисунок 1 – Ротор горнодобывающего комбайна и литые заготовки режущих вставок

Второй аспект связан с эффективностью производства режущего инструмента. Необходимость импорта порошковых материалов, стоимость оборудования для проката или спекания в финансовом плане значительно более затратны, чем локализация производства заготовок из быстрорежущего сплава методами литья. Внедрение инновационной технологии литья заготовок резцов фрез из быстрорежущего сплава непосредственно на Солигорском калийном комбинате позволит организовать эффективное безотходное производство инструмента.

С учетом сформулированных требований заказчика (руководства Солигорского калийного комбината) была разработана стратегия эффективной разработки инновационной технологии литья, обеспечивающей получение заготовок

режущих вставок резцов из быстрорежущего сплава с заданными свойствами. Стратегия включает три последовательных этапа:

Этап 1. Идентификация и формализация целей – функциональных показателей разрабатываемой технологии литья.

Этап 2. Выбор приоритетной технологии литья.

Этап 3. Определение рациональных областей значений заданных характеристик приоритетной технологии литья заготовок быстрорежущего сплава с заданными свойствами.

Инновационный характер проекта предполагает, что первые два этапа имеют ключевое значение для его успешной реализации. Наиболее эффективным способом организации исследований в рамках этих этапов являются методы экспертного оценивания. Именно их применение позволяет снизить расходы временных, финансовых и материально-технических ресурсов.

Существующие методы экспертного оценивания в качестве альтернативы экспериментальным ресурсоемким исследованиям предлагают специфический инструмент – опрос экспертов. Источником информации в данном случае служит суждение специалиста, которое носит субъективный характер и, соответственно, обладает не высоким уровнем достоверности и надежности. Это неизбежно повышает риски в отношении достоверности результатов исследований и, соответственно, риски не достижения конечных целей исследования – оптимальных характеристик разрабатываемой технологии.

Традиционно с методами экспертного оценивания связывают научное направление – квалиметрию. Характерный для нее способ повышения объективности оценки – использование согласованного мнения группы экспертов. Тем не менее, даже при правильной организации групповой опрос экспертов имеет ряд недостатков.

На основании комплексного исследования процесса экспертного оценивания установлено, что существующие методы нацелены на повышение достоверности получаемой информации главным образом за счет снижения групповой вариации мнений экспертов (групповой несогласованности). Нами выявлен неявный источник снижения достоверности экспертных оценок – индивидуальная несогласованность мнений одного эксперта. Рассматривается это свойство эксперта как вариация его мнения в отношении одного и того же объекта оценивания. Индивидуальная несогласованность мнений одного эксперта вносит в снижение достоверности эксперт-

ной информации вклад, соизмеримый с групповой вариацией мнений группы экспертов.

С учетом этого разработан комплекс методов экспертного оценивания, отличающихся особым подходом к сбору, анализу и оцениванию эвристических суждений экспертов. Комплекс включает три базовых метода:

– метод альтернатив как метод экспертного оценивания единичным экспертом объектов инноваций по одному показателю результативности;

– метод альтернатив как метод экспертного оценивания группой экспертов объектов инноваций по одному показателю результативности;

– метод «покоординатного спуска» как метод экспертного оценивания объектов инноваций одновременно по нескольким показателям результативности;

В докладе обоснован факт того, что комплекс базовых методов позволяет на всех этапах жизненного цикла продукции решать задачи всех типов, где требуется экспертная оценка.

На примере реализации проекта эффективной разработки инновационной технологии литья показаны возможности использования вышеуказанных методов экспертного оценивания.

Приведены результаты экспертной проработки этапов проекта разработки инновационной технологии литья заготовок из быстрорежущего сплава с уникальными заданными свойствами. В частности, на базе достоверных экспертных оценок определен комплекс показателей, которым должна отвечать технология. Обоснован наилучший вариант технологии как последовательности операций и методов их реализаций, который в максимальной степени отвечает сформулированному комплексу показателей.

Определены рациональные области значений параметров технологического процесса как исходных данных для последующих экспериментальных исследований на основе теории планирования эксперимента. Выявление ключевых параметров наилучшего варианта технологии литья произведена с помощью методологии функционального моделирования IDEF0, метода альтернатив, метода Парето, ABC-анализа. Для определения рациональных областей значений параметров технологического процесса разработан метод фрактально-покоординатного планирования виртуального эксперимента. Ключевым моментом метода является разработка плана виртуального эксперимента по аналогии с классическим методом симплексного планирования или методом «крутого восхождения».

УДК 621.317.791

**АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ
ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ****Белевич Д.Б., Гуревич В.Л.***Белорусский национальный технический университет**Минск, Республика Беларусь**Белорусский государственный институт метрологии**Минск, Республика Беларусь*

Электричество стало неотъемлемой частью современной жизни, однако, при небрежном отношении, оно несет в себе большую опасность. Для контроля параметров электробезопасности специалисты, предпочитающие надежность, удобство использования, а также высокую точность, используют многофункциональные измерители. Главным достоинством таких приборов является универсальность, что позволяет проводить ряд измерений по электробезопасности всего одним комбинированным устройством. Контроль точности измерений этих параметров является основой обеспечения защиты жизни и охраны здоровья человека. Именно поэтому все приборы, применяемые в этой сфере, подлежат обязательному метрологическому контролю.

Для решения этой задачи в Белорусском государственном институте метрологии (БелГИМ) создано универсальное рабочее место для обеспечения метрологического контроля как цифровых многофункциональных анализаторов электробезопасности, так и аналоговых измерителей.

В состав рабочего места входят следующие рабочие эталоны: многофункциональный калибратор Fluke 5520A, киловольтметр прецизионный Vitrek 4700, вольтметр универсальный цифровой GDM-78261, калибратор электрического сопротивления КС-100К5Т, калибратор времени отключения УЗО ERS-2, эталонные катушки индуктивности LN-1, набор мер электрического сопротивления типа P321, P331, магазины сопротивлений P4830/1, P4002, P4042.

Основные метрологические характеристики:

1. Многофункциональный калибратор Fluke 5520A:

- воспроизведение напряжения постоянного тока: от 0 до 1020 В, пределы допускаемой абсолютной погрешности \pm (12 миллионных долей (ppm) от установленного значения);

- воспроизведение силы постоянного тока: от 0 до $\pm 20,5$ А, пределы допускаемой абсолютной погрешности \pm (100 миллионных долей (ppm) от установленного значения);

- воспроизведение сопротивления: от 0 до 1100 МОм, пределы допускаемой абсолютной погрешности \pm (28 миллионных долей (ppm) от установленного значения);

- воспроизведение напряжения переменного тока: от 1мВ до 1020 В, от 10 Гц до 500 Гц, пределы допускаемой абсолютной погрешности \pm

(120 миллионных долей от установленного значения);

- воспроизведение силы переменного тока: от 29 мА до 20,5 А, от 10 Гц до 30 кГц, пределы допускаемой относительной погрешности \pm (0,06 % от установленного значения);

- воспроизведение частоты: от 0,01 Гц до 2,0 МГц, пределы допускаемой абсолютной погрешности \pm (25 миллионных долей (ppm) от установленного значения);

2. Калибратор электрического сопротивления КС-100К5Т:

- воспроизведение электрического сопротивления от 0,1 МОм до 5 ТОм, пределы допускаемой относительной погрешности \pm (1,5 % от измеренного значения);

3. Киловольтметр прецизионный Vitrek 4700:

- измерение напряжения постоянного тока: от 0 до 10 кВ, пределы допускаемой относительной погрешности \pm (0,03 % от измеренного значения + 0,03 В) (10 мВ);

- измерение напряжения переменного тока: от 0 до 10 кВ, пределы допускаемой относительной погрешности \pm (0,12 % от измеренного значения + 0,1 В) (10 мВ).

4. Вольтметр универсальный цифровой GDM-78261:

- измерение напряжения постоянного тока: от 0 до 1000 В, пределы допускаемой относительной погрешности \pm (0,0035 % от измеренного значения + 0,0005 % от диапазона);

- измерение напряжения переменного тока: от 1 до 750 В, от 10 кГц до 20 кГц, пределы допускаемой относительной погрешности \pm (0,06 % от измеренного значения + 0,03 % от диапазона); от 1 до 750 В, 20 кГц до 50 кГц, пределы допускаемой относительной погрешности \pm (0,12 % от измеренного значения + 0,05 % от диапазона);

- измерение силы постоянного тока: от 0 до 100 мА, пределы допускаемой относительной погрешности \pm (0,05 % от измеренного значения + 0,005 % от диапазона); от 0 до 10 А, пределы допускаемой относительной погрешности \pm (0,15 % от измеренного значения + 0,008 % от диапазона);

- измерение силы переменного тока: от 0 до 100 мА, от 10 Гц до 5 кГц, пределы допускаемой относительной погрешности \pm (0,1 % от измеренного значения + 0,04 % от диапазона); от 0 до 10 А, от 0 до 10 А, пределы допускаемой относи-

тельной погрешности $\pm (0,15 \%$ от измеренного $+ 0,06 \%$ от диапазона);

– измерение сопротивления: $\pm (0,01 \%$ от измеренного значения $+ 0,001 \%$ от диапазона);

5. Калибратор времени отключения УЗО ERS-2: от 10 мс до 190 мс: пределы допускаемой относительной погрешности $\pm (0,2 \%$ от измеренного значения $+ 0,2 \text{ мс}$); от 200 мс до 900 мс: пределы допускаемой относительной погрешности $\pm (0,5 \%$ от измеренного значения $+ 0,2 \text{ мс}$).

Основным недостатком данного рабочего места является то, что используемое оборудование было изготовлено разными изготовителями и, как следствие, сложно провести полноценную автоматизацию выполняемых работ. Такой недостаток несет ряд негативных последствий, таких как: высокая трудоемкость выполняемых работ, в связи с чем повышается стоимость оказания услуги, высокая вероятность ошибки метролога, ввиду необходимости сборки большого количества измерительных схем, что может привести к повреждению как эталонного оборудования, так и оборудования заказчика.

Для устранения этих недостатков рабочее место было дооснащено многофункциональным калибратором Fluke 5320A Multifunction Electrical Tester Calibrator, который является точным и гибким инструментом для эффективной калибровки и проверки тестеров электробезопасности. Калибратор 5320A объединяет множество функций в одном корпусе, благодаря чему можно отказаться от отдельных резисторов, декадных магазинов и других эталонных приборов, часто используемых для калибровки электрических тестеров. Эта единая система ускоряет и упрощает калибровку, поскольку вместо нескольких приборов пользователям нужно научиться использовать и обслуживать только один калибратор. Несмотря на то что автоматизация нескольких тестеров является сложной задачей, программное обеспечение для проведения калибровок MET/CAL® позволяет выполнять автоматизацию прибора 5320A, что еще больше повышает его скорость и работоспособность.

Данный калибратор позволяет проводить метрологический контроль: тестеры сопротивления изоляции, тестеры тока утечки, многофункциональные тестеры электроустановок, портативные тестеры электроприборов (РАТ), тестеры целостности цепи и тестеры сопротивления заземления; тестеры импеданса контура/линии и тестеры сопротивления заземляющего соединения; тестеры устройств защитного отключения (УЗО) и защитных устройств при замыкании на землю, а также тестеры Hipot.

Достоинства многофункционального калибратора Fluke 5320A:

– для метрологического контроля тестеров сопротивления изоляции до 1 кВ можно выбрать

широкий диапазон плавно регулируемых значений сопротивления от 10 кОм до 10 ГОм с разрешением 4,5 разряда, а также отдельное значение 100 ГОм;

– для метрологического контроля тестеров сопротивления изоляции 5 кВ можно использовать внешний адаптер, который будет функционировать как делитель напряжения 1 000 : 1 до 10 кВ, так и умножитель сопротивления $\times 1 000$ до 10 ТОм;

– входящий в комплект делитель 10 кВ позволяет измерять параметры измерителей до напряжения 10 кВ с более высокой точностью по сравнению с датчиком 40 кВ, что обеспечивает соотношение 4:1, необходимого для данного вида измерений;

– для метрологического контроля низкоомных тестеров калибратор Fluke 5320A воспроизводит сопротивление в диапазоне от 100 мОм до 10 кОм с разрешением 3,5 разряда. Имеет возможность выбора между 2-проводным и 4-проводным режимами измерения сопротивления;

– тестеры тока утечки имитируют ток утечки для методов постоянного тока утечки, тока прикосновения, дифференциального и имитационного тока утечки с разрешением 10 мкА в диапазоне от 0,1 до 30 мА;

– оснащен 16 мощными высоковольтными резисторами, повышающими сопротивление контура или линии на известную величину. В режиме сканирования сопротивление контура определяется автоматически, а в режиме активной компенсации контура компенсируется любой остаточный импеданс контура или линии.

– имитирует автоматический выключатель (УЗО/ GFCI) для проверки и калибровки тока и времени размыкания без размыкания автоматических выключателей установки;

– для метрологического контроля тестеров Hipot калибратор имеет встроенный измеритель, который определяет напряжение и силу тока для напряжений до 5 кВ, определяет коэффициент пульсации и общее гармоническое искажение (THD) Hipot тестеров.

– является универсальной заменой оборудования, входящего в состав рабочего места

В работе рассматриваются результаты исследования эффективности выполнения метрологического контроля измерителей параметров электробезопасности. С целью улучшения характеристик рабочего места и дальнейшей автоматизации поверочных и калибровочных работ проводится его модернизация. В работе представлены возможные способы ее реализации. Полученные результаты позволяют подтвердить целесообразность замены применяемых рабочих эталонов.

УДК 535.511

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ТОНКИХ И СВЕРХТОНКИХ ПЛЕНОК

Гуревич В.Л.¹, Белова Е.А.²¹Белорусский государственный институт метрологии
Минск, Республика Беларусь²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

В 2013 году во исполнение Плана мероприятий по реализации положений Концепции формирования и развития наноиндустрии в Республике Беларусь, утвержденной Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 18 февраля 2013 г. № 113, и плана мероприятий по созданию и оснащению инфраструктурных объектов для развития наноиндустрии на 2017–2020 годы, было разработано задание «Создать и оснастить лабораторию эталонов в нанометровом диапазоне измерений» подпрограммы «Эталонные Беларуси» ГНТП «Эталонные и научные приборы». В то время предполагался спрос на рутинные измерения объектов в нанометровом диапазоне с помощью сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ). Поэтому, помимо наноизмерительной машины, применяемой для калибровки эталонных мер высоты ступени и ширины шага в нанометровом диапазоне измерений, планировалось укомплектовать лабораторию сканирующим зондовым микроскопом. С помощью которого предполагалось удовлетворять спрос предприятий на рутинные измерения методом сканирующей зондовой микроскопии. В настоящее же время большинство предприятий, нуждающихся в измерениях с помощью СЗМ, имеют собственные сканирующие зондовые микроскопы. Поэтому большую актуальность приобретает обеспечение метрологического контроля самих сканирующих зондовых микроскопов и мер высоты ступени, ширины шага.

Развитие нанотехнологий стимулирует развитие методов исследования тонких пленок и пленочных покрытий. При этом особый интерес представляют пленки, толщины которых составляют несколько нанометров (сверхтонких пленок). Такие пленки широко используются в микроэлектронике, нанофотонике, вычислительной технике и промышленности, оптике и оптоэлектронике, космической и бытовой промышленности, в разнообразных технических отраслях. Основным параметром пленки является толщина, которая играет важную роль в формировании их электрических и оптических свойств, поэтому при получении требуется измерять данный параметр.

В настоящее время начали поступать запросы от предприятий, в частности письмо Министерства промышленности (Минпром) Республики Беларусь №13-10/6618 от 22.12.2018 г. по поводу метрологического контроля приборов, производящих измерения параметров тонких пленок.

На сегодняшний день существует много способов определения толщины тонких пленок такие как, эллипсометрия, интерферометрия, профилометрия, электронная и атомно-силовая микроскопия, но чаще всего применяются первые два метода.

Однако при измерении толщины пленок с помощью интерференционных средств измерений возникает ряд проблем. В частности, затруднение вызывает анализ интерференционных полос и определение порядка интерференции по разные стороны ступеньки, что приводит к получению неверных значений толщины пленки. В то время как эллипсометрия является наиболее точным и чувствительным методом измерений тонких пленок.

Спектральная эллипсометрия – чувствительная к состоянию поверхности, неразрушающая, неинтрузивная оптическая технология, широко применяемая для определения характеристик тонких и прозрачных слоев. Данная методика анализа основывается на изменении состояния поляризации света, когда он отражается под углом от образца тонкой пленки. Спектральная эллипсометрия позволяет определить целый ряд свойств тонких пленок:

- толщина пленки;
- толщина границы раздела;
- оптические постоянные (n , k);
- состав пленки;
- оптическая ширина запрещенной зоны;
- кристалличность;
- градация;
- анизотропия;
- однородность по глубине и площади.

Спектральная эллипсометрия является неинвазивной, неконтактной, неразрушающей технологией, в отличие от других методов, таких как ТЕМ (просвечивающая электронная микроскопия), SEM (растровая электронная микроскопия), SIMS (времяпролетная вторично-ионная масс-спектрометрия), ESCA (электронная спектроскопия для химического анализа), которые являются разрушающими и дорогостоящими технологиями.

Эллипсометрия позволяет определять несколько свойств пленки одновременно, быстро и без пробоподготовки. Кроме того, она точнее к тонким пленкам менее 10 нм, и покрывает спектральный диапазон от 190 до 2100 нм. В зависимости от типа материала, с помощью эллипсо-

метрии можно измерять толщину от нескольких долей нанометров до десятков микрометров, в том числе и многослойных пленок. Эллипсометрия позволяет измерять образцы толщины тонких пленок с точностью до сотых долей нанометров, что очень важно для микроэлектронной промышленности.

Материалы, которые можно исследовать с помощью спектральной эллипсометрии, включают полупроводники, диэлектрики, полимеры, органические материалы и металлы. Эллипсометрия также может использоваться для изучения границ раздела между твердым веществом и жидкостью и между двумя жидкостями.

Среди материалов, измеряемых методом эллипсометрии и используемых в выше названных применениях, можно назвать, к примеру, c-Si, a-Si, p-Si, mc-Si, CdTe, CIGS, CdS, SiN, SiO₂, SiC, GaAs, AlGaAs, AlN, InGaN, SnO₂, PET, ZnO, PbS, PbSe, TiO₂, Al, Ag, Au и углеродные нанотрубки.

На предприятиях Минпрома имеются спектральные эллипсометры, которые метрологически не обеспечены в Республике Беларусь. Также есть потребность предприятий в измерениях тонких пленок. Диапазон толщин пленок, в измерении которых нуждаются отечественные предприятия, составляет от 1 нм до 10 мкм, что несомненно является областью нанометрового диапазона измерений. Эллипсометры имеются на таких предприятиях как: ОАО «ИНТЕГРАЛ», ОАО «КБТЭМ-ОМО», ОАО «ПЕЛЕНГ». Меры толщины тонких пленок имеют и проводят метрологический контроль в России ОАО "Нафтан" и ОАО "Мозырский НПЗ".

В целях метрологического обеспечения измерений основной задачей является разработка программы и методики калибровки. Это необходимо для обеспечения достоверности результатов измерений, осуществления прослеживаемости к международным единицам Si.

Цель проведения метрологической аттестации является установление соответствия метрологических характеристик установленным тре-

бованиям технического задания. Основными задачами метрологической аттестации являются:

- рассмотрение и проведение экспертизы технической документации;
- установление метрологических характеристик в процессе аттестации;
- установление требований к условиям проведения исследований;
- установление точек, в которых определяют значения метрологических характеристик и количества наблюдений;
- установление исходных данных и условий определения погрешности эллипсометра;
- обработка данных наблюдений;
- установление межкалибровочного интервала;
- оформление результатов аттестации.

Методика калибровки включает в себя следующие операции:

- внешний осмотр;
- процедуру измерений;
- обработку результатов измерений;
- оформление результатов измерений.

При проведении калибровки одним из главных показателей соответствия является оценка неопределенности, которая влияет на достоверность результатов измерений. Для проведения оценки необходимо составить математическую модель измерения и определить все влияющие параметры. Провести анализ входных величин и составить бюджет неопределенности измерений.

На основании вышеизложенного, в рамках задания «Создать и оснастить лабораторию эталонов в нанометровом диапазоне измерений» подпрограммы «Эталон Беларуси» ГНТП «Эталон и научные приборы», приобретен эталонный эллипсометр и атомно-силовой многофункциональный микроскоп, что позволит расширить возможности области применения лаборатории.

Таким образом, сформулирована задача для метрологического обеспечения средств измерений, работающих на принципах спектральной эллипсометрии.

УДК 537.871.3

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ СОВМЕСТИМОСТЬ С ПОМОЩЬЮ БЕЗЭХОВЫХ ЭКРАНИРОВАННЫХ КАМЕР

Евсюк Е.А.¹, Волюнец А.С.², Гуревич В.Л.², Серенков П.С.¹

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный институт метрологии
Минск, Республика Беларусь

В повседневной жизни мы все больше и больше используем разнообразную носимую электронику, бытовую технику, применяем раз-

личные средства связи, появляются новые разработки в области медицины, военном деле. Но мало кто из нас задумывается что при работе,

такие устройства создают различные электромагнитные помехи, которые влияют на работу других технических средств поэтому для их одновременного и бесперебойного использования разработчикам уже на стадии проектирования средств необходимо учесть множество факторов.

Обеспечение нормальной работы совместно работающих технических средств и является целью электромагнитной совместимости (далее – ЭМС). Одним из испытаний на ЭМС является измерение напряженности поля радиопомех от испытуемого технического средства. При проведении таких измерений необходимы условия окружающей обстановки, обеспечивающие правильность и повторяемость результатов измерений.



Рисунок 1 – Структура ЭМС



Рисунок 2 – Внешний вид БЭК

Для обеспечения этих условий и созданы безэховые экранированные камеры (далее – БЭК) – экранированные помещения, внутренние поверхности которых полностью покрыты высокочастотным материалом (ВЧ-поглотителем), поглощающим электромагнитную энергию в рабочей полосе частот.

В настоящее время, на территории Республики Беларусь, функционируют около десяти открытых измерительных площадок, в том числе БЭК.

До сегодняшнего времени БЭК, а также альтернативные измерительные площадки проходили лишь аттестацию, но время не стоит на месте, и в соответствии с новой редакцией стандарта ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 все испытательное оборудование подлежит калибровке. Это и обозначило проблему отсутствия методики калибровки БЭК.

Цели и задачи исследования: необходимо решить задачу метрологического обеспечения испытаний на ЭМС с применением БЭК. Для достижения заданной цели необходимо: провести обзор существующих испытательных площадок, а в частности БЭК, изучить их принцип работы, обозначить их преимущества и недостатки; проанализировать существующие методы аттестации и калибровки измерительных площадок. Основываясь на полученной информации, с учетом всех преимуществ и недостатков, выбрать наиболее подходящий метод калибровки БЭК. На основании технических характеристик, выбрать наиболее подходящее измерительное оборудование необходимое для проведения калибровки. Оценить источники неопределенности измерений при выполнении калибровки БЭК.

Обзор принципов валидации испытательной площадки в диапазоне частот 30 МГц – 1 ГГц. В соответствии с ГОСТ CISPR 16-1-4-2013 установлены два метода валидации БЭК:

- метод нормализованного затухания испытательной площадки с широкополосными антеннами;
- метод опорной испытательной площадки с широкополосными антеннами.

Валидацию испытательной площадки проводят с применением двух одинаково поляризованных антенн. Валидацию проводят отдельно для горизонтальной и вертикальной поляризации. Затухание испытательной площадки получают из разницы:

- напряжения источника, подключенного к передающей антенне;
- полученного максимального напряжения, измеренного на зажимах приемной антенны во время сканирования высоты заданной антенны.

Измеренное затухание сравнивают с характеристиками, полученными на идеальной открытой испытательной площадке, что является определением измеряемой величины при валидации испытательных площадок. Результатом такого сравнения является отклонение затухания площадки, выражаемое в дБ. Площадка считается пригодной, когда значение отклонения затухания находится в пределах ± 4 дБ. Первое показание V_{direct} снимают при отсоединении двух коаксиальных кабелей от двух антенн и подключении их один к другому через адаптер. Второе показание V_{site} снимают, когда коаксиальные кабели снова подсоединяются

к своим антеннам, и измеряют максимальный сигнал при сканировании приемной антенны по высоте (1–4 м для измерительных расстояний 3 м и 10 м и, либо 1–4 м, либо 2–6 м для разнесения 30 м). При обоих этих измерениях напряжение источника сигнала V_i поддерживается постоянным. Полученные результаты вместе с нормализованным затуханием площадки (A_N) используются в приведенном ниже уравнении для получения результатов отклонения затухания. Все члены уравнения имеют размерность в децибелах.

$$\Delta A_S = V_{direct} - V_{site} - F_{aT} - F_{aR} - A_N - \Delta A_{TOT}$$

где: ΔA_S – отклонение затухания площадки; F_{aT} – коэффициент калибровки передающей антенны; F_{aR} – коэффициент калибровки приемной антенны; A_N – нормализованное затухание площадки в соответствии с ГОСТ CISPR 16-1-4-2013; ΔA_{TOT} – коэффициент коррекции взаимного импеданса.

F_{aT} и F_{aR} являются коэффициентами калибровки антенны в свободном пространстве. Первые два члена уравнения характеризуют реальное измерение затухания площадки, то есть разность $V_{direct} - V_{site}$ представляет собой классический вид затухания площадки, которое определяется вносимыми потерями на трассе распространения с учетом двух используемых антенн. Теоретические значения поправочного коэффициента взаимного импеданса ΔA_{TOT} для геометрических параметров при использовании резонансных настраиваемых диполей, разнесенных на 3 м, горизонтальной и вертикальной поляризации приведены в вышеупомянутом стандарте. Для других геометрических параметров, например 10 или 30 м

или, если используют широкополосные антенны, поправки взаимного импеданса не требуются.

Испытательные площадки для измерения напряженности поля радиопомех в полосе частот от 1 до 18 ГГц. Конструкция испытательных площадок, используемых для проведения измерений в этой полосе частот, должна минимизировать влияние отражений излучаемых полей радиопомех на сигнал, принимаемый измерительной антенной. Такая минимизация влияния отражений возможна, например, в безэховой камере. Если конструкция площадки не обеспечивает полностью безэховых условий (например полубезэховая камера) используют поглощающий материал для частичного покрытия металлической пластины заземления. Валидацию испытательной площадки проводят путем измерения коэффициента стоячей волны по напряжению данной площадки S_{VSWR} . При этом рабочий объем площадки оценивают при конкретной комбинации на площадке приемной антенны, поглощающего материала, установленного на пластине заземления, и соблюдении измерительного расстояния.

Литература

- ГОСТ CISPR 16-1-4-2013 «Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. Часть 1-4. Аппаратура для измерения радиопомех и помехоустойчивости. Антенны и испытательные площадки для измерения излучаемых помех».
- ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий».

УДК 658.562.3

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ РАЗРАБОТКИ ГОСУДАРСТВЕННОГО СТАНДАРТА, РЕГЛАМЕНТИРУЮЩЕГО ПОВЕРКУ КАЛИБРАТОРОВ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ

Красильников Е.В.¹, Гуревич В.Л.², Бардонов А.И.², Серенков П.С.¹

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный институт метрологии
Минск, Республика Беларусь

В современных промышленных условиях для обеспечения высокой производительности и максимального качества выпускаемой продукции необходимо внедрение новейшего оборудования, или модернизация существующего. Это влечёт за собой увеличение количества контрольно-измерительных средств измерений участвующего в управлении технологическими процессами.

Известно, что для контроля точности и воспроизводимости измерений, ответственных за качество выпускаемой продукции, необходимы существенные трудозатраты.

Одним из универсальных способов решения данной проблемы является применение многофункциональных средств измерений, к которым относятся калибраторы многофункциональные.

В докладе приведены основные характеристики данных приборов, ключевыми из которых являются компактность, точность, мобильность. Использование калибраторов многофункциональных на современном производстве даёт возможность поверки и калибровки в полевых и лабораторных условиях различных средств измерений. Калибраторы мно-

гофункциональные позволяют воспроизводить и измерять с высокой точностью силу тока, напряжение, частоту, сопротивление, давление, температуру и другие физические величины.

Принцип действия калибраторов основан на аналого-цифровом преобразовании входных сигналов в цифровую форму и цифро-аналогом преобразовании выходных сигналов.

По конструктивному исполнению калибраторы являются малогабаритными переносными приборами, питание которых осуществляется от сменных батарей, аккумуляторов, или от сети переменного тока через адаптер. На передней панели калибраторов расположен жидкокристаллический дисплей и клавиатура. На дисплее отображаются результаты измерений/воспроизведений физических величин, а также сведения о режиме работы калибратора. Каналы измерения и воспроизведения сигналов силы и напряжения постоянного тока являются гальванически развязанными.

Калибраторы осуществляют измерение и воспроизведение сигналов напряжения и силы постоянного тока, сопротивления, в том числе сигналов термопар и термопреобразователей сопротивления, измерение и воспроизведение частоты периодических сигналов, количества импульсов, а также – с помощью внешних или встроенных барометрических модулей для измерения атмосферного, абсолютного, избыточного и вакуумметрического давлений.

Так же в комплекте калибраторов многофункциональных могут присутствовать модули дифференциального давления и модули избыточного давления, способные измерять разряжение.

Данные приборы применяются в качестве эталона или рабочего средства измерений при испытаниях, поверки и калибровки в полевых или лабораторных условиях преобразователей электрических сигналов, вторичных измерительных приборов, каналов измерительных систем.

Одним из преимуществ является модульная система с унифицированным токовым сигналом, что позволяет охватить широкий спектр приборов и дополнительной аппаратуры, применяемых на производстве. Большинство калибраторов имеет возможность подключения к компьютеру для управления процессами измерений, а также передавать результаты калибровки на компьютер. Благодаря своим характеристикам калибраторы многофункциональные дают возможность автоматизировать процессы поверки, калибровки и юстировки приборов.

В совокупности это позволит существенно снизить трудозатраты, а также своевременно контролировать большинство технических процессов на различных производствах.

Благодаря всем выше изложенным преимуществам калибраторов многофункциональных, парк данных приборов постоянно увеличивается. Возрастает спрос на проведение метрологического контроля этих приборов.

Калибраторы многофункциональные в большинстве случаев применяются в отраслях легкой и тяжелой промышленности, на производствах с высоким уровнем точности. Для контроля метрологических характеристик большинство этих приборов подвергается поверке или калибровке.

Согласно Закону Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений» поверка – составная часть метрологического контроля, включающая выполнение работ, в ходе которых подтверждаются метрологические характеристики средств измерений и определяется соответствие средств измерений требованиям законодательства Республики Беларусь об обеспечении единства измерений.

Поверку средств измерений, предназначенных для применения в сфере законодательной метрологии, проводят юридические лица государственной метрологической службы.

По решению Госстандарта право поверки средств измерений, предназначенных для применения в сфере законодательной метрологии, может быть предоставлено аккредитованным поверочным лабораториям других юридических лиц. Деятельность этих лабораторий осуществляется в соответствии с действующим законодательством и ТНПА по обеспечению единства измерений, утверждаемым Госстандартом.

Поверка производится в соответствии с методикой поверки, которая устанавливается при утверждении типа средства измерений.

Результатом поверки является подтверждение пригодности средства измерений к применению или признание средства измерений непригодным к применению.

Если средство измерений признано непригодным, то оно может применяться после ремонта и положительных результатов поверки.

Калибровка – составная часть метрологического контроля, включающая выполнение работ, в ходе которых устанавливаются метрологические характеристики средств измерений путем определения в заданных условиях соотношения между значением величины, полученным с помощью средства измерений, и соответствующим значением величины, воспроизводимым эталоном единицы величины

Калибровка осуществляется при выпуске средств измерений из производства или ремонта, при их применении и ввозе в Республику Беларусь.

Калибровка средств измерений, предназначенных для применения либо применяемых в

сфере законодательной метрологии, осуществляется на основе договора юридическими лицами, входящими в государственную метрологическую службу, или иными юридическими лицами, аккредитованными для ее осуществления.

Периодичность калибровки средств измерений, применяемых в сфере законодательной метрологии, устанавливается Государственным комитетом по стандартизации Республики Беларусь.

Калибровка средств измерений, применяемых вне сферы законодательной метрологии, осуществляется юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями, осуществляющими производство средств измерений, их ремонт, реализацию, применение, передачу в аренду, в том числе прокат, либо на основе договора иными юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями.

Периодичность калибровки средств измерений, применяемых вне сферы законодательной метрологии, устанавливается юридическими лицами, индивидуальными предпринимателями и иными физическими лицами, применяющими эти средства измерений.

Существует острая необходимость создания унифицированного государственного стандарта поверки калибраторов многофункциональных, так как на данный период времени существующие методики не охватывают весь парк приборов. Создание стандарта позволит облегчить процедуру внесения калибраторов многофункциональных в государственный реестр средств измерений Республики Беларусь.

Унификация операций при проведении поверки с учётом новейших приборов данного вида позволит снизить трудозатраты.

В настоящее время на территории Республики Беларусь отсутствуют действующие технические нормативные правовые акты в области технического нормирования и стандартиза-

ции, взаимосвязанные с разрабатываемым государственным стандартом.

Основными целями разработки государственного стандарта являются:

- обеспечение прослеживаемости и признания результатов испытаний на соответствие требованиям ТР ТС;

- установление требований к поверке калибраторов многофункциональных с целью обеспечения подтверждения метрологических характеристик, а также установление единых требований к методикам поверки в виде технического нормативного документа (ТНПА) в соответствии с Законом Республики Беларусь «О техническом нормировании и стандартизации»;

- обеспечение современного научного и технического уровня ТНПА на методики поверки средств измерений и поддержание в актуальном состоянии нормативной базы ТНПА в области обеспечения единства измерений.

Для достижения поставленных целей при разработке государственного стандарта на методику поверки калибраторов многофункциональных должны быть решены следующие задачи:

- проведение анализа существующих требований к объекту стандартизации и обоснование необходимости разработки государственного стандарта на методику поверки;

- разработка единой методики поверки на калибраторы многофункциональные на основе проведенного анализа с учетом современных достижений науки и техники.

Разрабатываемый государственный стандарт будет определять операции, проводимые в процессе первичной и последующих поверок, и устанавливать методы и аппаратные средства поверки, позволяющие подтвердить соответствие поверяемых калибраторов многофункциональных требованиям ТНПА и других документов, устанавливающих требования к поверяемому средству измерений, и пригодность его к применению.

УДК 658.562

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ МАГАЗИНОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Станкевич М.А.¹ Гуревич В.Л.²

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный институт метрологии
Минск, Республика Беларусь

Одним из способов повышения эффективности метрологической оценки средств измерений может являться создание специализированных автоматизированных средств измерений.

Основными направлениями автоматизации являются:

- замена косвенных измерений прямыми, и создание многофункциональных комбинированных приборов;

- разработка средств измерений, в которых все необходимые регулировки выполняются автоматически, либо вообще не требуются;

– разработка измерительно-вычислительных комплексов (ИВК), имеющих в своем составе процессоры с необходимым периферийным оборудованием и программным обеспечением;

– устранение или минимизация «человеческого фактора» при выполнении функций системой или прибором;

Естественная физиологическая ограниченность возможностей человека в восприятии и обработке больших объемов измерительной информации стала одной из основных причин появления таких средств измерений, как информационно-измерительные приборы (виртуальные приборы) и измерительные системы (ИС). Структура современных ИС чрезвычайно разнообразна, быстро развивается и существенно зависит от решаемых задач, а их деление в настоящее время еще не имеет достаточно полного и четкого толкования. Переход к построению цифровых средств измерений привел к созданию автоматизированных измерительных систем с использованием микропроцессоров.

Автоматизированными средствами измерений считают автономные непрограммируемые приборы и гибкие измерительные системы, построенные на базе цифровой техники. Автономные непрограммируемые приборы работают по жесткой программе и предназначены для измерений определенных параметров сигналов и характеристик цепей. В этих приборах автоматически выполняется только часть измерительных операций, например, определение полярностей входного сигнала и установка пределов измерений. Гибкие интегральные системы позволяют программным способом перестраивать систему для измерения различных физических величин и менять режим измерений. При этом аппаратная часть измерительной системы не изменяется. По структурному построению они подразделяются на интерфейсные, микропроцессорные и компьютерно-измерительные. Наиболее мощные – измерительно-вычислительные комплексы (ИВК) – создаются путем объединения с помощью соединительной многопроводной магистрали в одну измерительную систему компьютера, измерительных приборов и устройств отображения информации (рисунок 1). Связь между компьютером и всеми остальными узлами и их совместимость обеспечивается с помощью совокупности аппаратных, программных и конструктивных средств.

Необходимость измерения огромного количества разнообразных физических величин потребовала разработки средств измерений, позволяющих получать необходимую информацию без непосредственного участия человека, т.е. выполняющих измерения автоматически. Автоматизация позволяет обеспечить:

– длительные, многократные измерения; одно-временное измерение большого числа величин;

– измерение параметров быстропротекающих процессов;

– измерения, характеризующиеся большими массивами информации и сложными алгоритмами ее обработки.

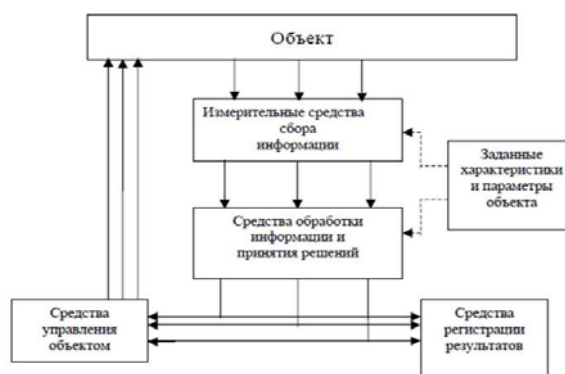


Рисунок 1 – Структура измерительно-вычислительного комплекса

Рассмотрим два способа автоматизации проверки магазинов сопротивления двумя различными методами измерений. Один из способов автоматизации проверки основан на использовании метода непосредственной оценки с помощью современного цифрового измерителя сопротивления (например, нановольтметра/микроомметра *Agilent 34420A*) (рисунок 2).

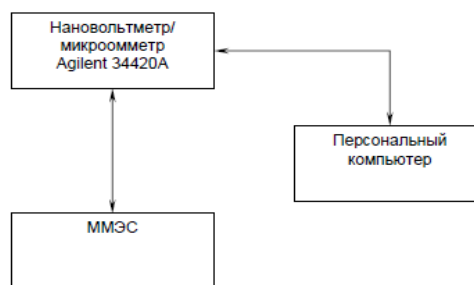


Рисунок 2 – Схема проверки методом непосредственной оценки

При подключении магазина сопротивления к измерителю используется четырехзажимная схема подключения. В программе реализована функция «Проверки связи с прибором», что позволяет на начальном этапе проведения проверки исключить ошибку при подключении магазина сопротивления. Измерения данным методом можно разделить на три этапа. На первом этапе нановольтметр/микроомметр *Agilent 34420A* измеряет четыре значения начального сопротивления магазина сопротивления. Затем программа рассчитывает среднее значение начального сопротивления и вариацию начального сопротивления. Эти данные сохраняются в памяти программы.

На втором этапе определяется основная абсолютная погрешность магазина сопротивления. Нановольтметр/микроомметр *Agilent 34420A* измеряет действительное значение каждой ступени

декады магазина сопротивления (с учетом начального сопротивления). Затем программа рассчитывает абсолютную погрешность i -ой ступени n -ой декады:

$$\Delta_{in} = R_n - (R_{изм} - R_0), \quad (1)$$

где R_n – номинальное значение сопротивления i -ой ступени n -ой декады, Ом; $R_{изм}$ – измеренное значение сопротивления, Ом; R_0 – начальное сопротивление магазина, Ом.

Нестабильность магазина сопротивления за год определяется на третьем этапе путем сравнения действительных значений сопротивлений, полученных при данной и предыдущей поверках.

Программа позволяет сравнивать полученные результаты абсолютной погрешности и нестабильности магазина сопротивлений с допускаемыми значениями, что исключает ошибку при анализе полученных результатов.

Далее на основе полученных данных формируется протокол поверки, свидетельство о поверке или заключение о непригодности.

Другой способ автоматизации поверки основан на использовании прецизионного мультиметра *Fluke 8508A*, эталонной однозначной меры электрического сопротивления, программируемого калибратора ПЗ21 и регулируемого термостата (рисунок 3).

Прецизионный мультиметр *Fluke 8508A* измеряет падение напряжения на эталонном и измеряемом сопротивлениях при прохождении через них одного и того же тока. Задание тока производится от программируемого калибратора ПЗ21. Затем по известному действительному значению эталонного сопротивления и измеренному напряжению рассчитывается значение измеряемого сопротивления.

Измерение того или иного падения напряжения осуществляется внутренним коммутатором прецизионного мультиметра *Fluke 8508A*, по командам от персонального компьютера. Сначала проводится измерение падения напряжения U_1 на сопротивлении эталонной однозначной меры сопротивления (канал 1), а затем на измеряемом сопротивлении U_2 (канал 2). По известному значению сопротивления однозначной меры сопро-

тивления R_0 можно определить измеряемое сопротивление по формуле:

$$R_x = \frac{U_2}{U_1} R_0. \quad (2)$$

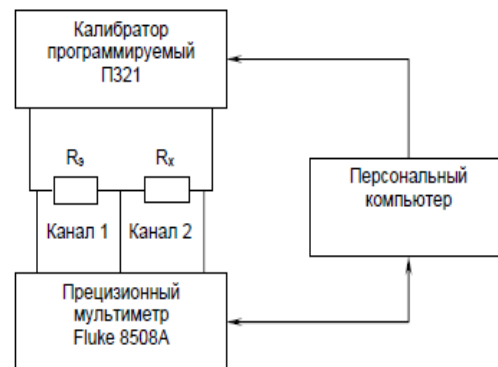


Рисунок 3 – Альтернативный метод поверки

Основная задача термостата регулируемого термостата состоит в том, чтобы задать и поддерживать определенную температуру эталонных мер электрического сопротивления для поддержания точности при поверке.

Исходя из выше изложенного, можно сделать вывод, что измерение сопротивления данным способом по существу сводится к измерению напряжения с помощью прецизионного мультиметра *Fluke 8508A*.

Из рассмотренных выше способов автоматизации рабочего места при поверки ММЭС можно сделать следующие выводы. Автоматизация поверки мер электрического сопротивления обеспечивает:

- простоту и удобство при проведении измерений для оператора;
- компактность размещения;
- повышение безопасности;
- легкость формирования полученных данных в протокол поверки, свидетельство о поверке и заключение непригодности;
- хранение в памяти исходных данных о всех типах поверяемых ММЭС;
- упрощение организации технического обслуживания.

УДК 621.317

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ДИОДНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Коробко Ю.С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Современная информационно-измерительная система (ИИС) не мыслима без комплекса достаточно сложной обработки информации, получаемой на основании автоматических измерений и обработке измерительной информации, исходя-

щей от многочисленных преобразователей (датчиков). Результатом этой обработки служит предоставление требуемой и достоверной информации в нужном виде, в нужном месте, и в нужное время. Все это необходимо для полноценного

управления производственными процессами, принятия решений в определенных областях деятельности, операционному менеджменту и т. п.

Развитие современных технологий неустанно диктует применение в информационно-измерительных системах многочисленных преобразователей, разнообразие которых позволяет ей выполнять измерительные задачи с высокой эффективностью.

В докладе анализируется возможность применения вакуумных и полупроводниковых приборов в процессе преобразования измерительной информации и способах передачи ее в измерительный канал ИИС.

В ИИС часто стоит задача передачи измерительной информации от преобразователей, работающих на высоких частотах. Такие преобразователи называются частотными. К ним относятся, например, датчики движения, близости, перемещения, диодный датчик мощности, ультразвуковой дальномер и др. Частотные датчики являются наиболее простыми и универсальными. Они обладают достаточно высокой разрешающей способностью, сравнительно большой мощностью выходных сигналов и высокой помехоустойчивостью. Эти датчики легко стыкуются с вычислительными машинами и комплексами. Кроме того, обработка и интегрирование частотных сигналов, а также получение образцовых мер частоты с большой стабильностью осуществляются простыми техническими средствами.

Преимущества, связанные с использованием частотных сигналов, а также относительная простота построения частотных датчиков привели к интенсивной их разработке для измерения практически всех физических величин.

Выходным измерительным сигналом частотного датчика может быть, например, высокочастотный сигнал в диапазоне от 10 МГц до 1 ГГц, модулированный по амплитуде. Его информативным параметром является амплитуда. Передача высокочастотной измерительной информации в измерительный канал может осуществляться различными способами: либо с использованием коаксиального кабеля, либо по волноводу.

Достоинствами волновода по сравнению с коаксиальным кабелем являются низкие потери мощности, низкий коэффициент стоячей волны и высокая рабочая частота, однако они дороги, громоздки, сложны для монтажа и не рассчитаны на многократные изгибы и перегибы. Применение коаксиальных кабелей ограничено их конструктивными особенностями: массой, необходимостью специального монтажа, ограниченностью полосы пропускания и т.п. Кроме того, коаксиальный кабель требует согласования выходного импеданса источника и входного импеданса приемника со своим характеристическим импедансом.

Перечисленные недостатки применения волноводов и коаксиальных кабелей еще больше проявляются при значительном удалении датчика от последующего преобразователя ИИС.

Обойти указанные недостатки можно простым и сравнительно недорогим способом – использовать в качестве измерительного канала металлические провода, например, витую пару. Преимущество витых пар заключается в простоте монтажа и ремонта, а также в низкой стоимости кабеля. Ее экранирование обеспечит защиту от электромагнитных наводок, а максимальная длина может составить до 100 м.

Однако использования витой пары ограничивается несущей частотой измерительного сигнала, поступающего с высокочастотного датчика. Так, приемлемый диапазон частот измерительного сигнала, передаваемого современной витой парой без значительных потерь, может составлять до 100 МГц.

В докладе анализируется возможность использования дополнительного преобразования измерительного сигнала от высокочастотного датчика из переменного в постоянный перед подачей его в измерительный канал, представляющего из себя проводники типа витая пара. В качестве преобразователя предлагается использовать преобразователи переменного сигнала в постоянный (детекторы, например, пиковый), построенных на базе вакуумных и полупроводниковых приборов (диодов).

Вакуумные приборы, несмотря на необходимость подведения к ним напряжения питания (накала), позволяют осуществлять преобразование измерительной информации в диапазоне частот до 700 МГц. Кроме того, они просты в устройстве, относительно недороги, у них меньшая зависимость параметров от температуры окружающей среды, меньшая инерционность, практически отсутствует обратный ток.

Преимуществами полупроводниковых приборов являются меньшие размеры, меньшее потребление мощности, высокая надежность. Однако у них большая зависимость характеристик от температуры, наличие порога открывания, меньшая устойчивость к перегрузкам, возможность ионизации электромагнитным импульсом. Диапазон частот измерительных сигналов, преобразуемых полупроводниковыми диодами, доходит до 20 ГГц. Однако с увеличением частоты измерительного сигнала усложняется конструкция преобразователя и увеличивается его стоимость.

Литература

1. Волков Ю.В. Датчики для измерений при производстве электрической и тепловой энергии: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2019 – 89 с.
2. Чудинов И.Л. Информационные системы и технологии: учебное пособие / И.Л. Чудинов, В.В. Осипова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013 – 145 с.

УДК 658.5

РЕАЛИЗАЦИЯ ПИЛОТНОГО ПРОЕКТА ПО ПОВЫШЕНИЮ УДОВЛЕТВОРЕННОСТИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НА БАЗЕ РУП «НАЦИОНАЛЬНЫЙ АЭРОПОРТ «МИНСК»

Михейчик А.В., Ленкевич О.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Целью деятельности информационного Центра «КАЧЕСТВО» и студенческой научно-исследовательской лаборатории «КАЧЕСТВО», функционирующих на базе кафедры «Метрология, стандартизация и информационные системы» приборостроительного факультета является совершенствование процесса подготовки молодых специалистов в Белорусском национальном техническом университете и создание условий для реализации творческих способностей студентов специальности «Метрология, стандартизация, сертификация», участвующих в научно-исследовательской, инновационной деятельности. Научный руководитель лаборатории поставил задачу о выполнении пилотного проекта, направленного на повышение уровня удовлетворенности потребителей, результат которого можно будет использовать в рамках действующей СМК БНТУ.

Оценка удовлетворенности включает, в том числе и мероприятия по привлечению потребителей и повышению конкурентоспособности предприятия. В качестве базы для реализации пилотного проекта выбран РУП «Национальный аэропорт Минск» [1]. Для повышения удовлетворенности пассажиров аэропорта, предложено использовать системы непрерывного улучшения бизнес-процессов, основанной на проектном подходе. Учитывая специфику деятельности организации целесообразно использовать малые проекты гибкой системы управления проектами (Agile project management) по методологии Scrum, которые позволяют постоянно поддерживать и улучшать бизнес-процесс. Scrum представляет собой гибкую методологию разработки с нестандартным распределением ролей в команде и уникальной организацией итераций. Scrum, как и другие agile методы управления проектами, применяет командный подход, короткие итерации и непрерывное улучшение в процессе работы [2].

Правильное использование проектного подхода даст свои результаты в виде плана совершенствования процесса (выхода процесса совершенствования качества). Этот результат будет в том случае, если бизнес-процесс формально определен и внутренний аудит бизнес-процесса показывает идентичность его описанию реальному состоянию дел. Использование данного подхода позволило разработать оперативный план совершенствования основного бизнес-процесса «Обслуживание пассажиров и обработка багажа». Первым этапом совершенствования

процесса является проведение аудита соответствия, а вторым – составление самого плана совершенствования. План совершенствования включал, в том числе и разработку плана-графика планирования работ по методологии Scrum.

В соответствии с требованиями методологии Scrum мероприятия по совершенствованию процесса планирования с целью повышения удовлетворенности потребителей следует разделить на 4 соответствующих проекта:

– Проект № 1 – анализ функциональной модели основного бизнес-процесса «Обслуживание пассажиров и обработка багажа» в номинации «как есть» на соответствие требованиям СТБ ISO 9001-2015 [3];

– Проект № 2 – построение функциональной модели основного бизнес-процесса в номинации «как надо»;

– Проект № 3 – мониторинг и определение контрольных точек основного бизнес-процесса;

– Проект № 4 – обоснование целесообразности изменения методики оценки удовлетворенности потребителей. Разработка, при необходимости, новой методики и расчет степени удовлетворенности потребителей.

В проекте № 1 в соответствии с методологией разработки и совершенствования инженерной составляющей СМК РУП «Национального аэропорта “Минск”» на первом этапе была проанализирована функциональная модель основного бизнес-процесса – обслуживание пассажиров и обработка багажа. В результате анализа функциональной модели в состоянии «как есть» установлено, например, что для некоторых функций процесса не определена ответственность, не идентифицированы входные данные, а также отсутствует модуль «классический цикл» PDCA. Срок реализации проекта – 1 неделя.

В проекте № 2 для построения модели сети процессов «как надо» необходимо учесть все выявленные несоответствия в процессе анализа модели сети процессов «как есть». Инструментом моделирования была выбрана система функционального моделирования IDEF0. Срок реализации проекта – 3 недели.

В проекте № 3 для повышения уровня удовлетворенности важна полная ориентация на потребителя, контрольные точки должны быть необходимыми и достаточными. Для решения поставленной задачи нами использовался такой инструмент управления качеством как модель Кано. Модель Кано – метод, используемый для

оценки эмоциональной реакции потребителя на отдельные характеристики продукции. Полученные с его помощью результаты позволяют управлять удовлетворенностью и лояльностью потребителей. Практические шаги реализации модели Кано: анкетирование потребителей, позволяющее выявить их жалобы/претензии и пожелания; построение причинно-следственной диаграммы Исикавы влияющих факторов; оценка выявленных влияющих факторов на удовлетворенность потребителей по атрибутам модели. Нами рассматривались три типа требований по модели Кано: обязательные, одномерные, привлекательные.

Прежде чем воспользоваться данной моделью нами был проведен анализ выявленных контрольных точек в процессе мониторинга. Для оптимального способа взаимодействия с потребителями были разработаны анкеты. На основании выявленных жалоб и претензий была составлена причинно-следственная диаграмма связи влияющих факторов. Как известно, не все требования одинаково влияют на степень удовлетворенности потребителей, поэтому службе качества важно выявить, какие из них имеют наибольшую ценность и стоит ли учитывать данное требование в виде показателя удовлетворенности.

Для выбора контрольных точек методом экспертной оценки группа из пяти ведущих специалистов аэропорта распределила выявленные претензии и замечания на три типа: основные, базовые и волнующие (воздействующие).

Примерами основных (желаемых) факторов (свойств) является улучшение условий в зданиях аэровокзала (добавить места для сидений в залах ожидания вылета, перед стойками регистрации в зале для общего доступа пассажиров). Базовые (ожидаемые) свойства воспринимаются потребителями нейтрально, однако их отсутствие вызывает высокую степень недовольства, например, температура в залах ожидания. Примерами волнующих (воздействующих) факторов могут быть – увеличение и разнообразие меню на борту самолета. На основании рабочей модели Кано (рисунок 1) определены контрольные точки основного процесса СМК. Срок реализации проекта составил 3 недели.

При реализации проекта № 4 были проанализированы существующая методика расчета степени удовлетворенности потребителя и отчеты об удовлетворенности потребителей за осенне-зимний период 2016/2019 гг.

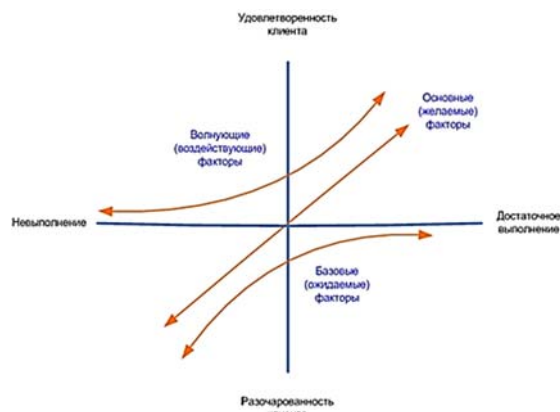


Рисунок 1 – Модель Кано

В 2016–2017 гг. показатель удовлетворенности составил 75,19 %, в 2017–2018 гг. – 84,14 %, а в 2018–2019 наблюдалось снижение показателя до 75,19 %.

Для проверки достоверности результатов опроса, определения целесообразности изменения методики оценивания удовлетворенности потребителей процесса «Обслуживания пассажиров и обработка багажа», пересмотра целевых показателей и критериев оценивания, нами использовался критерий полноты t (критерий Стьюдента). Критерий показал, что в целом падение удовлетворенности потребителей является незначительным, а нестабильную динамику развития показателя удовлетворенности за 2018/2019 гг. можно считать случайной. Необходимость в разработке новой методики оценки удовлетворенности потребителей была признана нецелесообразной, сделан вывод о возможности совершенствования существующей методики и разработке новых анкет. Срок реализации проекта – 3 недели.

Реализуемый проектный подход показал высокую результативность организации работ с минимальными затратами и в сопоставимые сроки и может быть использован БНТУ при планировании и проведении любой деятельности, направленной на улучшение.

Литература

1. Михейчик А.В., Ленкевич О.А., Букатич Е.А. Использование проектного подхода по методологии SCRUM для повышения удовлетворенности потребителей / А.В. Михейчик, О.А. Ленкевич, Е.А. Букатич // Стандартизация. 2020. – № 4. – С. 54–58;
2. <https://docplayer.ru/44480005-Analiza-klientskoj-bazy.html>;
3. СТБ ISO 9001-2015 Системы менеджмента качества. Требования.

На современном уровне создания учебных материалов наряду с модулями, выполненными как обычная мультипликация, могут разрабатываться интерактивные компьютерные модели реальной системы. В них пользователь имеет возможность изменять численные значения параметров модели по своему усмотрению или в соответствии с предлагаемыми закономерностями и наблюдать изменения в функционировании системы в результате изменения входных параметров. При необходимости в модели меняются не только временные, силовые, энергетические и пространственные зависимости, определяющие состояние всей системы или ее отдельных элементов.

Качество конкретного компьютерного учебно-методического комплекса сегодня оценивают на интуитивном уровне, полагаясь на выборочный контроль материалов, причём, как правило, даже сам автор комплекса не может его объективно оценить из-за отсутствия нормированного подхода.

Для отбора в комплекс учебных материалов достаточно высокого уровня качества необходимо проводить их квалиметрическую экспертизу.

Экспертиза компьютерного учебно-методического комплекса должна включать работу на формальном уровне – проверку минимально необходимого состава комплекса и исполнения его элементов на профессиональном уровне (проверку корректности представленных материалов), а также проверку методического уровня представления материалов. Формальные требования можно ограничить анализом полноты материалов комплекса (соответствие программе дисциплины в целом и каждого из разделов) и языковой грамотности их изложения.

Содержательный анализ комплекса следует направить на контроль логичности изложения материалов и оценку их доступности пользователю. Как более частные свойства логичности изложения материалов можно установить такие, как выделение главного в общем содержании и представление элементов комплекса в логической последовательности. Кроме того, для важнейших положений должна быть представлена необходимая аргументация.

Выделение главных элементов можно осуществлять, используя технические приёмы (перечисления, шрифты), или акцентирующие слова, повторение информации и др. Под представлением элементов в логической последовательности следует понимать отсутствие нарушений в выбранной структуре представления материалов,

поскольку для значительной части учебных дисциплин единственной логической последовательности изложения не существует.

Доступность материалов включает такие более простые свойства, как доступность смысла, доступность языка, отсутствие дефектов содержания и поддержка примерами, помогающими пониманию и/или закреплению содержательных моментов.

Очевидно, что для обеспечения объективной оценки качества компьютерного учебно-методического комплекса необходимо выполнение значительной квалиметрической работы, направленной на подготовку процедуры экспертного оценивания, включая отбор экспертов, и разработку методик осуществления самого процесса оценивания. Кроме общих принципов квалиметрического оценивания качества информационных материалов и заложенной в комплекс методики их представления обучаемым, возможно создание отдельной экспертной группы, которая будет заниматься оцениванием качества таких элементов комплекса, как программные продукты. Оцениванию может подвергаться соответствие универсальных программных продуктов, использованных для создания конкретных обучающих программ, эффективность их использования, возможность замены иными исходными программными продуктами, обеспечивающими более рациональное достижение поставленных целей.

Дидактическую ценность программ (рациональность использования статичных изображений, мультимедийных средств обучения в виде мультипликаций, интерактивных компьютерных моделей) должны оценивать педагоги. Очевидно, что эти эксперты должны быть квалифицированными методистами, но они также должны быть подготовлены для собственно экспертной работы, желательно в группе.

Возможности трансформации компьютерного комплекса позволяют в значительной мере освободить первоначального разработчика от предъявления повышенных требований к форме представления материалов и их техническому исполнению. Особая ценность компьютерных комплексов заключается в возможности их перманентного совершенствования. Сегодняшняя ситуация (поспешное внедрение дистанционного обучения без его фундаментальной подготовки) может рассматриваться как первый шаг, обеспечивший появление множества сырых материалов, подлежащих доработке.

УДК 621.3

ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЙКИ И СУШКИ БЫТОВЫХ ПОСУДОМОЕЧНЫХ МАШИН ПРИ ИСПЫТАНИИ ИХ ПО ПАРАМЕТРАМ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Серенков П.С., Белов П.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Энергоэффективность есть рациональное использование энергии. Предполагает внедрение таких технологий, которые обеспечат меньшее потребление энергии при сохранении масштабов деятельности. Одной из характеристик бытовых посудомоечных машин, на которой акцентируют внимание производители и продавцы, являются показатели энергоэффективности, этими показателями могут быть класс энергоэффективности, обозначаемый латинскими буквами от A+++ до D, класс эффективности сушки, обозначаемый латинскими буквами от A до G, годовое потребление энергии, годовое потребление воды и скорректированный уровень звуковой мощности.

На данный момент на территории Республики Беларусь в рамках измерения параметров, которые необходимы для расчета индекса и выявления класса энергетической эффективности, а также определение коэффициентов мойки и сушки бытовых посудомоечных машин действует ТНПА СТБ EN 50242-2017 «Машины посудомоечные бытовые. Методы измерения эксплуатационных характеристик». Эта методика устанавливает тип загрязнений, количество посуды в одном комплекте. В одном комплекте посуды СТБ EN 50242-2017 содержатся несколько видов тарелок и предметы сервировки. По составу данная нагрузка состоит из двух материалов, это фарфор и сталь (хирургическая).

СТБ EN 50242-2017 включает в себя проведение от 5 циклов испытаний для определения коэффициента мойки и 5 циклов испытаний для определения коэффициента сушки бытовых посудомоечных машин. Если логарифмический доверительный интервал $\ln W_c$ больше либо равен 0,073, количество циклов может увеличиться до 12, поэтому максимальное количество циклов для того чтобы определить коэффициент мойки и сушки и выдать заключение о соответствии равняется 24 циклам, а временной диапазон 24 циклов это 5 рабочих недель. Данные два вида испытаний для определения коэффициентов сушки и мойки не могут проводиться совместно, что достаточно трудозатратно и приводит к большим расходам финансовой составляющей заводоизготовителей, которым необходимо данный вид испытаний.

К бытовым посудомоечным машинам предъявляется ряд требований, которые должны быть полностью подтверждены ее эксплуатационными характеристиками. К бытовым посудомоечным

машинам предъявляют требования двух ТНПА, это СТБ 2456-2016 «Машины посудомоечные бытовые. Энергетическая эффективность. Требования» и СТБ 2455-2016 «Машины посудомоечные бытовые. Энергетическая эффективность. Маркировка».

Рынок бытовых посудомоечных машин достаточно велик. Развитие технической составляющей и использование инновационных систем, таких как автоматическое определение типа загрязнения и количества загруженных предметов в посудомоечную машину, автоматическое открывание дверцы облегчают использование ее в быту, но все эти системы способны корректировать время программы, температуру нагрева, количества забранной воды. Данные инновационные системы способны легко достигать требования стандартов, которые установлены на данный момент на территории Республики Беларусь в рамках энергетической эффективности, СТБ 2456-2016 «Машины посудомоечные бытовые. Энергетическая эффективность. Требования» и СТБ 2455-2016 «Машины посудомоечные бытовые. Энергетическая эффективность. Маркировка» поэтому стоит необходимость о разработке новой методики определения эксплуатационных характеристик бытовых посудомоечных машин.

На сегодняшний день существует новая методика определения эксплуатационных машин это ИЕС 60436:2015 с дополнениями от 2020 года. В данной методике увеличено количество посуды в одном комплекте, что значит увеличение потребления энергии и забора воды бытовой посудомоечной машины, что будет стимулировать заводы-изготовители к дальнейшему их развитию в разработке новых инновационных систем.

В данной методике пересмотрен тип посуды, добавлены металлические предметы, а именно две кастрюли, появились кружки, стеклянная чаша, пересмотрен тип некоторых загрязнителей, а именно загрязнения из фарша будет использоваться только говядина, и самое главное новый тип моющего средства, который отличается по составу от старого.

ИЕС 60436:2015 с дополнениями от 2020 года предусматривает от 5 циклов испытаний по определению коэффициента мойки и сушки, которые можно проводить совместно. Максимальное количество циклов 13, это 3 рабочие недели при максимальном количестве циклов. Данная

методика является достаточно менее трудозатратной и является экономически выгодной по сравнению с СТБ EN 50242-2017, но является ли она достаточно точной и воспроизводимой для определения эксплуатационных характеристик.

По сравнению с методикой СТБ EN 50242-2017 новые методы ИЕС 60436:2015 с дополнениями от 2020 года, наблюдаем что новые методы испытаний достаточно приближены к использованию бытовых посудомоечных машин в быту, так как и в быту и при проведении испытаний, в соответствии с новой методикой, будет использовано достаточное большое количество материалов, а именно: сталь (хирургическая), фарфор, керамика, стекло, пластик, нержавеющая сталь. Из этого может следовать то, что потребители при выборе посудомоечной машины будут уверены в ее задекларированных на энергетической маркировке значениях.

Все эти нововведения, в полной мере скажутся на коэффициентах мойки и сушки, а также на классе энергетической эффективности бытовых посудомоечных машин.

Поэтому стоит задача в определении эффективной методики определения мойки и сушки бытовых посудомоечных машин двух методов испытаний. Вследствие этого будут проведены испытания по двум методам СТБ EN 50242-2017 и ИЕС 60436:2015 с дополнениями от 2020 года на одном испытуемом образце. Исходя из проведенных испытаний будет выявлена зависимость между измеряемыми величинами: времени, потребления энергии, забора воды, потребляемая мощность в режиме с низким потреблением электроэнергии, коэффициентов сушки и мойки бытовых посудомоечных машин и в следствии этого определена наиболее эффективная и менее затратная методика измерений.

В организационном плане необходимо перед проведением испытаний подготовить испытуемый образец, а также приготовить воду, которая будет соответствовать требованиям двух методик. Далее будут проведены испытания на одном испытуемом образце, который будет параллельно работать с эталонной посудомоечной машиной, по СТБ EN 50242-2017 и по ИЕС 60436:2015 с дополнениями от 2020 года с приведением двух протоколов испытаний. Информация, приведенная в протоколе испытаний будет отражать соответствие требованиям наших стандартов (СТБ 2456-2016 «Машины посудомоечные бытовые. Энергетическая эффективность. Требования» и СТБ 2455-2016 «Машины посудомоечные бытовые. Энергетическая эффективность. Маркировка»), показаны измеренные значения эталонной посудомоечной машины, а также необходимые значения, которые потребуются для дальнейшего сравнения с эталонной посудомоечной машиной, все необходимые измеренные значения испытуемого образца, так же будет показан детальный расчет всех параметров, которые вытекают из измеренных значений и присвоен класс энергетической эффективности. Так же по проведению испытаний будет показана загрузка испытуемой посудомоечной машины и эталонной посудомоечной машины в соответствии с методикой СТБ EN 50242-2017 и по ИЕС 60436:2015 с дополнениями от 2020 года, количество предметов, загружаемых в испытуемый образец и эталонную посудомоечную машину, отображено правильность нанесения каждого типа загрязнения на определенный вид посуды либо сервировочного комплекта, указана порционность каждого типа загрязнения в граммах на одну тарелку и на один сервировочный предмет, количество моющего и ополаскивающего средства.

УДК 621.791

ФРАКТАЛЬНО-ПОКООРДИНАТНЫЙ МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ПОИСКА РАЦИОНАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ПРОДУКЦИИ

Серенков П.С., Воронова Т.С., Романчак В.М.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Ключевым этапом жизненного цикла инновационной продукции является процесс проектирования и разработки, в рамках которого формируется оптимальный комплекс функциональных характеристик. Спецификой данного процесса в первую очередь является изначально низкая информативность объекта разработки и невозможность применения метода аналогов и преедентов. Априорное отсутствие необходимого количества информации соответственно порождает риски не достижения оптимальных характеристик исследу-

емого объекта инноваций, его неготовности к внедрению и практической реализации.

В настоящее время системные исследования с целью разработки инновационных технологий получения материалов со специальными свойствами осуществляются, как правило, методами планирования эксперимента.

Разработка объекта инноваций является, как правило, многофакторной задачей. Количество экспериментов N при реализации, например, классического полнофакторного плана напрямую

зависит от количества выбранных потенциально влияющих факторов n и составляет приблизительно $N = 2^n$. В практике экспериментальных исследований широкое распространение получили методы уменьшения размерности факторного пространства N , применяемые на стадии так называемого предпланирования эксперимента. Наиболее привлекательным в части экономии материально-технических, финансовых, временных ресурсов является экспертный метод априорного ранжирования. Данный метод базируется на классических подходах квалиметрии, и в качестве альтернативы экспериментальным ресурсоемким исследованиям предлагает опрос экспертов. Источником информации в данном случае служит суждение специалиста, которое имеет субъективный характер и, соответственно, обладает не высоким уровнем достоверности.

Комплексные исследования процесса экспертного оценивания позволили сделать вывод: что существующие методы экспертного оценивания обладают рядом критических недостатков, не позволяющих корректно их применять для разработки объектов инноваций. Последние, в свою очередь, порождают риски не достижения оптимальных характеристик исследуемого объекта инноваций, его неготовности к внедрению и практической реализации.

С целью повышения эффективности ресурсоемких экспериментальных исследований нами разработан метод фрактально-покоординатного планирования виртуального эксперимента. Основное назначение метода – повышение эффективности и достоверности получаемых результатов на предварительной стадии исследований экспертными методами.

Ключевым моментом метода фрактально-покоординатного планирования является разработка плана виртуального эксперимента по аналогии с классическим методом симплексного планирования или методом «крутого восхождения». В качестве симплекса (единичного элемента планирования), от реализации которого зависит дальнейший путь экспериментального исследования, в методе фрактально-покоординатного планирования принят фрактал. Фрактал – единичный элемент виртуального планирования, в общем случае структурно представляющий собой план полнофакторного эксперимента типа 2^3 . Фрактал, в котором участвуют номинально три фактора (каждый фактор определен на двух уровнях и соответственно количественно представлен двумя предельными значениями), соответствует методологии функционального моделирования IDEF0, в соответствии с которой технологический процесс с позиций полноты и не избыточности должен быть представлен комплексом из факторов трех категорий «input», «mechanism», «control».

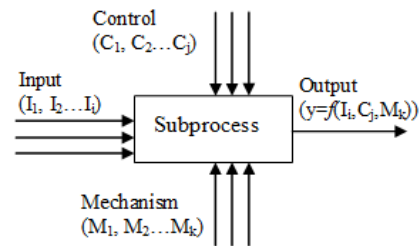


Рисунок 1 – Классификация ресурсов, задействованных в выполнении процесса (в нотации IDEF0)

Первый фрактал формируется следующим образом. Из трех сводных комплексов ранжированных на предыдущем шаге факторов категорий «input» (I_1, I_2, \dots, I_i), «mechanism» (M_1, M_2, \dots, M_j), «control» (C_1, C_2, \dots, C_k) необходимо выбрать по одному наиболее влияющему фактору I_1, M_1, C_1 . С учетом того, что для каждого фактора определены предельные значения $I_1^1, I_1^2, C_1^1, C_1^2, M_1^1, M_1^2$ (уровни варьирования каждого фактора 1 и 2), следует построить план полнофакторного эксперимента типа 2^3 , включающий в общем случае 8 вариантов технологического процесса (рисунок 2). Графически план такого эксперимента можно представить в виде куба, вершины которого представляют собой комбинацию уровней трех факторов $I_1^1, I_1^2, C_1^1, C_1^2, M_1^1, M_1^2$. При этом остальные факторы следует зафиксировать на некотором уровне, например, на первом.

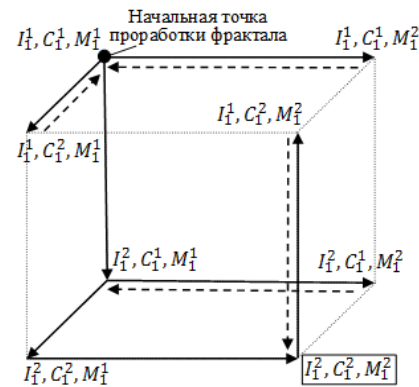


Рисунок 2 – Фрактально-покоординатный план виртуального эксперимента

Сущность виртуального эксперимента в рамках предлагаемого метода в отличие от классического факторного планирования заключается в «покоординатном перемещении к потенциально лучшему варианту технологии» (по аналогии с методом «крутого восхождения»). Реализация виртуального эксперимента заключается в том, что руководитель исследовательской группы задает вопросы эксперту типа: «Вариант технологического процесса (I_1^1, C_1^1, M_1^2) лучше или хуже варианта (I_1^1, C_1^1, M_1^1) для достижения целевого значения?».

Вопросы задаются последовательно, причем последовательность формируется по следующим правилам:

Каждый вопрос формируется таким образом, что сравниваются два варианта технологического процесса, параметры которых представлены двумя соседними вершинами куба (рисунок 2). В этом случае сравниваемые варианты технологического процесса отличаются уровнями только одного из трех факторов, два других фактора остаются неизменными.

Каждый последующий вопрос зависит от того, каков был ответ эксперта на предыдущий вопрос, что соответствует технике планирования эксперимента типа «крутое восхождение». Переход от одного варианта технологического процесса к другому (из одной вершины куба в другую, соседнюю) возможен в случае, если эксперт определит, что последующий вариант лучше предыдущего.

Из начальной вершины (I_1^1, C_1^1, M_1^1) возможны три альтернативных вектора перехода в соседнюю вершину куба:

1. $(I_1^1, C_1^1, M_1^1) \rightarrow (I_1^2, C_1^1, M_1^1)$ – изменяется уровень фактора I_1 («input»),

2. $(I_1^1, C_1^1, M_1^1) \rightarrow (I_1^1, C_1^2, M_1^1)$ – изменяется уровень фактора C_1 («control»),

3. $(I_1^1, C_1^1, M_1^1) \rightarrow (I_1^1, C_1^1, M_1^2)$ – изменяется уровень фактора M_1 («mechanism»).

Руководитель проекта может выбрать любой из трех векторов формирования вопроса эксперту, при условии, что второй вариант лучше первого (I_1^1, C_1^1, M_1^1) .

Каждый последующий переход в рамках фрактала имеет два альтернативных вектора по-

ординатного перемещения. Например, из вершины (I_1^2, C_1^1, M_1^1) возможны переходы:

1. $(I_1^2, C_1^1, M_1^1) \rightarrow (I_1^2, C_1^2, M_1^1)$,

2. $(I_1^2, C_1^1, M_1^1) \rightarrow (I_1^2, C_1^1, M_1^2)$.

Выбор руководителем проекта вектора перехода аналогичен первому этапу виртуального эксперимента в рамках фрактала. Если же эксперт затрудняется ответить на вопрос, лучше или хуже последующий вариант технологического процесса по сравнению с предыдущим для достижения целевого значения, то можно «подойти» к данной вершине куба по другому, альтернативному пути. Если эксперт по-прежнему затрудняется ответить на вопрос о преимуществе оцениваемого варианта технологического процесса, представленного в данной вершине куба, по сравнению с предыдущим, то в этих двух точках плана эксперимента необходимо поставить физический эксперимент и количественно определить какой вариант лучше.

Последовательность вопросов в рамках фрактала можно интерпретировать как пространственную непрерывную ломаную линию по ребрам куба. «Движение» по этой линии и есть реализация техники покоординатного спуска (рисунок 2).

Результатом проработки первого фрактала как последовательности вопросов экспертам является наилучшая комбинация уровней факторов первого ранга I_1^i, M_1^j, C_1^k , которая в наибольшей мере обеспечивает, по мнению экспертов группы, достижение целевого значения.

Второй (факторы I_2^i, M_2^j, C_2^k) и последующие фракталы последовательно формируются аналогично до тех пор, пока не будет проработана вся совокупность выявленных факторов (рисунок 1).

УДК 621.791

ФОРМИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА НА ОСНОВЕ КЛАССИФИКАЦИИ ВИДОВ ЭНДОПРОТЕЗОВ ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА И ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К НИМ

Серенков П.С., Герасимчик Е.Е.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Компания «АЛТИМЕД» уже более 10 лет производит эндопротезы тазобедренного сустава – цементные и безцементные, имплантаты остеосинтеза, а также инструмент для их постановки. В настоящее время ЗАО «АЛТИМЕД» является крупнейшим и единственным производителем медицинских имплантатов в республике Беларусь. Продукция компании ЗАО «АЛТИМЕД» получила широкое применение в больницах Беларуси, России и Казахстана.

Тазобедренный сустав считается самым крупным сочленением костей человеческого организма. Нагрузки, которые ему приходится испытывать в процессе жизнедеятельности очень

большие. На сегодняшний день при операции по замене тазобедренного сустава существует около 60 различных типов конструкций эндопротезов тазобедренных суставов. Обычно протез состоит из ножки, головки, чашки и вкладыша. Каждый из этих компонентов имеет свой размерный ряд. Что в свою очередь еще больше увеличивает номенклатуру изготавливаемых изделий на предприятии.

При всем таком многообразии видов и конструкции протезов остро стоит вопрос по обеспечению качества изготавливаемой продукции, определения и проведения необходимых испытаний. Для этого необходима систематизировать

существующую номенклатуру выпускаемых изделий и их характеристик. Мною проанализирована конструкции эндопротезов тазобедренного сустава и выделены основные компоненты (рисунке 1):



Рисунок 1 – Составляющие компоненты эндопротеза тазобедренного сустава

– *Чашкой эндопротеза*. Это та часть, которая должна замещать вертлужную впадину тазовых костей;

– *Головкой протеза*. Она представляет собой металлическую шарообразную деталь, покрытую полимером. Таким образом удается достичь максимально мягкого скольжения при вращении головки в чашке протеза во время выполнения движений конечностью;

– *Вкладыш* – узел трения (рисунком 2), соединяющий чашку и шар.



Рисунок 2 – Узел трения эндопротеза тазобедренного сустава

Узел трения – это то, между какими материалами протеза осуществляется взаимодействие в результате движений в искусственном тазобедренном суставе: головки эндопротеза, надеваемой на конус ножки, и вкладыша суставной впадины. Головка может состоять из металла, либо керамики. Вкладыш может состоять из полиэтилена, металла либо керамики. Тип и качество материалов, применяемых в узлах трения, во многом определяет срок службы эндопротеза. По этому признаку эндопротезы тазобедренного сустава делятся на:

– металл-полиэтилен (головка из металла, вкладыш из полиэтилена);

– керамика-полиэтилен (головка из керамики, вкладыш из полиэтилена);

– керамика-керамика (головка из керамики, вкладыш из керамики);

– оксид алюминия-полиэтилен оксид алюминия представляет собой металлический сплав с прочной и износостойкой керамической поверхностью, что позволяет сочетать преимущества металла и керамики).

– *Ножкой протеза*. Она изготавливается исключительно из металла, поскольку испытывает самые большие нагрузки по сравнению с другими частями эндопротеза. Если головка протеза имитирует головку бедренной кости, то его ножка замещает шейку и верхнюю треть бедренной кости.

Каждый компонент эндопротеза тазобедренного сустава обладает набором характеристик, влияющих на качество изделия. Представлен анализ существующих международных стандартов, относящихся к эндопротезированию и обеспечению необходимого качества. Выделены основные показатели качества:

– *геометрические* показатели (габаритные размеры, размерный ряд);

– *Физические* показатели (используемый материал, шероховатость поверхности, биологические показатели). К конусу ножки устанавливаются особые требования относительно показателя шероховатости. Это связано с тем, что поверхность конуса является посадочной и должна обеспечивать необходимое трение с ответной поверхностью (конусом головки).

– *Химические* показатели (химический состав материала, используемого при изготовлении имплантов). При изготовлении эндопротезов главной роль играет используемый материал. От состава материала напрямую зависит отторгаемость протезов человеческим организмом. Наилучшую совместимость с живыми тканями обеспечивает сплав титана.

– *Эксплуатационный* показатель – это способность сохраняет свои эксплуатационные показатели при воздействии нагрузок во время эксплуатации. К ножке эндопротеза тазобедренного сустава установлено два эксплуатационных показателя необходимых для обязательного подтверждения: выдерживание статической и динамической нагрузки.

– *Механические* показатели (пределная прочность, условный предел текучести при непропорциональном удлинении, относительное удлинение) устанавливают прочность титана на растяжение.

Очень актуальным вопросом считается выбор способа фиксации эндопротеза. В этом отношении все не так просто по нескольким причинам. Ведь металлические и керамические материалы должны быть прочно соединены с костями. Только при соблюдении этого условия возможно выполнение функции опоры и ходьбы:

– *Фиксация эндопротеза при помощи цемента* – специального биологического клея, который после застывания будет прочно соединять костные ткани с структурами эндопротеза;

– *Бесцементная фиксация*. Такие изделия имеют специальную конструкцию и устроены таким образом, что на их поверхности есть множество мелких выступов, углублений, неровностей и отверстий. Со временем костная ткань прорастает в них, и протезированная кость становится единым комплексом с эндопротезом;

– *Гибридная или смешанная фиксация*. Предполагает сочетание цементного и бесцементного способов. При этом ножка фиксируется в бедренной кости при помощи цемента, а чашка ввинчивается в вертлужную впадину.

Эндопротез, которым будет замещен патологически измененный тазобедренный сустав должен обладать достаточной прочностью, надежностью фиксации, высокими функциональными способностями и быть достаточно инертным по отношению к тканям человеческого организма. Всем этим требованиям отвечают изделия, изготовленные из высококачественных металлических сплавов, полимеров и керамики. Как правило, один эндопротез содержит в себе сочетание всех этих материалов.

Как видно из написанного выше эндопротез обладает большой номенклатурой показателей качества. На данный момент не существует документов который бы систематизировал и определял все необходимые показатели качества, относящиеся к этому изготовлению и испытанию эндопротеза тазобедренного сустава.

Представлены результаты работы по выявлению, систематизации и классификации факторов,

влияющих на качество изготавливаемого эндопротеза тазобедренного сустава.

По результатам анализа действующих ТНПА, касающихся изготовления эндопротезов тазобедренного сустава, выделены основные показатели качества для соблюдения технических требований. Например, для ножек эндопротеза тазобедренного сустава установлено 12 основных размеров и два дополнительных.

Для достижения необходимого уровня качества изготавливаемых эндопротезов необходим контроль показателей качества.

В докладе представлены результаты метрологических изысканий организационного, методического, технического плана для обеспечения необходимого уровня контроля и испытаний качества продукции.

Представлены проекты необходимых методических документов для проведения испытаний, подтверждающих качество выпускаемой продукции. Определен комплекс необходимого измерительного и испытательного оборудования, условия и оснастка для проведения испытаний и получения достоверных результатов.

Литература

1. ГОСТ Р ИСО 5832-2-2014 «Имплантаты для хирургии. Металлические материалы». Часть 2
2. ГОСТ Р ИСО 7206-4-2012 «Имплантаты для хирургии. Эндопротезы тазобедренного сустава частичные и тотальные». Часть 4
3. ГОСТ Р ИСО 7206-4-2012. Имплантаты для хирургии. Эндопротезы тазобедренного сустава частичные и тотальные. Часть 4.
4. ГОСТ Р ИСО 7206-6-2012. Имплантаты для хирургии. Эндопротезы тазобедренного сустава частичные и тотальные. Часть 6.

УДК 504.064.38

ОБОСНОВАНИЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОГРАММЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА

Фомиченко Е.А., Серенков П.С.

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь*

В современном мире с постоянно возникающими проблемами загрязнения окружающей среды, остро встает вопрос по отслеживанию состояния качества воздуха в городах Республики Беларусь, в местах крупных промышленных производств, на объектах транспортной инфраструктуры на наличие в его составе вредных для жизнедеятельности человека и окружающей среды веществ.

Качество воздуха формируется в результате сложного взаимодействия природных и антропогенных факторов. Естественная топография местности, характер застройки и климатические параметры являются важными условиями, опре-

деляющими качество атмосферного воздуха и предпосылки изменения уровня загрязнения.

С целью оценивания качества окружающего воздуха возникает необходимость создания системы наблюдений за качеством воздуха, за наличием в его составе вредных примесей. Основная цель мониторинга атмосферного воздуха – наблюдение, оценка, прогноз и выявление тенденций изменения состояния атмосферы для предупреждения негативных ситуаций, угрожающих здоровью людей и окружающей среде.

К наиболее опасным и требующим круглосуточного мониторинга веществам относятся:

- диоксид серы SO₂;
- диоксид азота NO₂;
- оксид углерода CO;
- озон O₃;
- общие летучие органические соединения;
- твердые частицы, фракции размером 2,5 и 10 микрон.

При оценке состояния атмосферного воздуха учитываются среднесуточные и максимально разовые предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ. Средние за сутки значения сравниваются с ПДК среднесуточной (ПДКс.с.), а максимальные – с максимально разовой (ПДКм.р).

В настоящее время в Республике Беларусь мониторинг атмосферного воздуха на наличие опасных примесей проводится в 19 промышленных городах республики, включая областные центры, города Полоцк, Новополоцк, Орша, Бобруйск, Мозырь, Речица, Светлогорск, Пинск, Жлобин, Лида, Барановичи, Борисов и Солигорск, а также станцию фоновый мониторинга Березинский заповедник. Регулярными наблюдениями охвачены территории проживания 87 % населения крупных и средних городов Республики Беларусь.

Государственная сеть мониторинга атмосферного воздуха включает 67 пунктов наблюдений. В Минске функционирует 12 пунктов наблюдений; в Могилеве – 6, Гомеле и Витебске – по 5, Бресте, Гродно – по 4 пункта наблюдений; в остальных промышленных центрах – от 1 до 3 пунктов наблюдений. В городах Минск, Витебск, Могилев, Гродно, Брест, Гомель, Полоцк, Новополоцк, Солигорск, в районе Мозырского промышленного узла и на станции фоновый мониторинга Березинский заповедник работают в штатном режиме 16 автоматических станций, позволяющих получать информацию о содержании в воздухе приоритетных загрязняющих веществ в режиме реального времени.

На 51 пункте наблюдений с дискретным режимом отбора проб воздуха, отбор проб осуществляется техником-химиком с последующим проведением химического анализа в лаборатории.

Однако существующие методы и средства измерений существенно уступают по точности и методам измерений современным иностранным аналогам. Применяемые на сегодняшний день в нашей стране методы мониторинга требуют немедленной автоматизации и модернизации.

Ввиду этого определена крайняя необходимость мониторинга загрязнения атмосферного воздуха в Республике Беларусь с точностью и характеристиками, не уступающими зарубежным средствам измерений.

Так как для зарубежных аналогичных средств измерений характерны высокая стоимость и сложность их метрологического обеспечения, в нашей стране была определена необходимость

в разработке собственного средства измерений для контроля загрязнения атмосферного воздуха, не уступающего по характеристикам аналогам.

С целью решения данного вопроса группой специалистов была разработана станция мониторинга загрязнения атмосферного воздуха, в состав которой входит измеритель качества воздуха UniTesS AQM-03, позволяющий в режиме реального времени измерять содержание токсических газов SO₂, NO₂, O₃, CO, общих летучих органических соединений и твердых частиц в атмосферном воздухе.

Данное средство измерений представляет собой автоматический, многофункциональный прибор непрерывного действия.

Корпус измерителя качества воздуха соответствует степени защиты оболочки IP34, а это значит, что воздействие возможных погодных условий не отразится на работоспособности прибора.

Измеритель функционирует под управлением встроенного программного обеспечения, которое осуществляет функции сбора, обработки, хранения и передачи измерительной информации.

Данное средство измерений не имеет собственного дисплея, результаты измерений передаются на внешнее устройство в виде цифровых сигналов по радиоканалу. Из этого следует, что получение и анализ результатов измерений осуществляются удаленно.

Для изучения работы датчиков, входящих в состав измерителя качества воздуха, создана собственная лабораторная база, аналогов которой нет в Республике Беларусь. На базе лаборатории смоделированы различные камеры для испытания работоспособности средства измерений во всевозможных экстремальных условиях.

Посредством изучения работы средства измерений, была выявлена зависимость показаний измерителя качества воздуха от воздействия повышенных и пониженных температур, а также влажности окружающего воздуха. С целью минимизации данных влияющих факторов, были внесены компенсации в программное обеспечение прибора.

Также, в ходе испытаний измерителя качества воздуха, у датчиков измерения концентрации токсических газов был обнаружен дрейф нуля.

Проведя многочисленные испытания и изучив применяемые методы аналогичных средств измерений, было принято решение устранить влияние данного фактора конструктивно. В конструкцию блока измерения газов был установлен генератор нулевого воздуха, который с заданным интервалом автоматически подает на вход средства измерений нулевой воздух. В это время измеритель качества воздуха автоматически осуществляет поднастройку нуля.

Помимо этого, была выявлена зависимость снижения чувствительности датчиков измерения

газов SO₂, NO₂ и озона и также внесена поправка в результат измерений, устраняющая воздействие старения.

Однако для запуска данного средства измерений в серийное производство, и подтверждения соответствия результатов его измерений, необходимо осуществить ряд мероприятий для защиты от последствий неточных и неправильно выполненных измерений. Так как средство измерений попадает под сферу законодательной метрологии, измеритель качества воздуха должен пройти через процедуру метрологического контроля в соответствии с законом Республики Беларусь от 5 сентября 1995 года № 3848-ХП «Об обеспечении единства измерений».

Основной проблемой проведения метрологического контроля является тот факт, что средствами органов государственной метрологической службы невозможно в полной мере провести испытания данного прибора ввиду отсутствия необходимых средств контроля.

По этой причине остро встает вопрос как законодательно утвердить средство измерений для контроля качества воздуха.

С учетом того, что не все характеристики могут быть проконтролированы с помощью органов государственной метрологической службы Республики Беларусь, разработана программа, рассказывающая о том, как можно реализовать данную проблему.

В докладе изложена данная программа метрологического контроля, в которой рассказано как пройти и как выполнить весь цикл метрологического контроля в соответствии со всеми требованиями законодательства Республики Беларусь.

В программе рассмотрены аспекты с точки зрения максимальной эффективности, изложены основные методы и средства, приведены расчеты, схемы и изображения, поясняющие принцип работы прибора.

Данная программа позволит выйти на серийное изготовление рассмотренных измерителей качества воздуха и обеспечить Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды современными высокоточными средствами измерений.

УДК 371.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЕТЕНТНОСТИ И ОСВЕДОМЛЕННОСТИ ПЕРСОНАЛА В ВОПРОСАХ СИСТЕМНОГО МЕНЕДЖМЕНТА

Серенков П.С., Чурак Н.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

С каждым годом требования к процессу обучения возрастают, потребности в компетентном персонале увеличиваются. Для отлаженной работы любой организации наличие компетентного персонала является неотъемлемой частью. Также одним из факторов, влияющим на конкурентоспособность любой организации, является наличие компетентного персонала.

Согласно СТБ ISO 9000-2015 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь» [1]: компетентность – способность применять знания и навыки для достижения намеченных результатов.

Согласно [2]: осведомленность – наличие сведений, знаний о чем-нибудь.

Требования к обеспечению компетентности и осведомленности персонала установлены во всех стандартах на системы менеджмента. При этом в 2020 году разработана первая редакция проекта государственного стандарта СТБ ISO 30401 «Системы менеджмента знаний. Требования», назначением которого является осуществление поддержки организации для продвижения и обеспечения возможности создания ценности посредством знаний.

Основным и наиболее популярным методом повышения компетентности и осведомленности персонала по вопросам системного менеджмента является проведение семинаров. Зачастую в процессе обучения на семинаре упор делается на теоретическую основу, так как чтение лекции занимает 90 % времени проведения семинара. В лучшем случае в процессе проведения семинара отводится некоторое время и на проведение практических занятий. Во время проведения семинара возникает много аспектов связанных с недостаточным уровнем усвояемости материала, например: невнимательное слушание лекций, монотонность процесса обучения, нехватка либо отсутствие практической составляющей и командной работы и др. Вышесказанное свидетельствует о том, что в основном результативность проводимых семинаров не высока.

С появлением новых технологий образуются многочисленные пути и возможности для совершенствования и упрощения функционирования различных сфер деятельности, в том числе и сферы системы образования. Чем быстрее система образования адаптируется к использованию благ научно-технического прогресса, тем

соразмернее возрастает качество процесса обучения.

Одной из движущих сил научно-технического прогресса являются информационные технологии.

Согласно [3] информационные технологии (ИТ) можно представить совокупностью трёх основных способов преобразования информации:

- хранения;
- обработки;
- передачи.

Методами информационных технологий являются методы обработки и передачи информации [3].

Средства информационных технологий – это технические, программные, информационные и другие средства, при помощи которых реализуется информационная технология [3].

Информационные технологии, позволяя интенсифицировать информационные процессы, повысить эффективность использования накопленных обществом информационных ресурсов, обеспечивают себе устойчивое и динамичное развитие. Информационные технологии интегрируют достижения фундаментальных и прикладных наук (математика, кибернетика, программирование, информатика, лингвистика, психология, эргономика и др.), инженерного знания (в области компьютерной техники, коммуникационных систем, средств связи), образования (педагогические технологии, дистанционное обучение), искусства (анимация, видеокультура, живопись, дизайн) [3].

Примеры информационных технологий представлены на рисунке 1.

Многообразие информационных технологий и сфер их практического приложения порождают потребность в разработке теоретических и эмпирических классификаций. В качестве оснований эмпирических классификаций специалисты используют различные признаки: сфера применения; вид информации и способ её обработки; характер информационных процессов и способ их реализации; вид носителя информации; контингент и уровень подготовки пользователей; степень унификации технологических решений; уровень интеграции и др. [3].



Рисунок 1 – Примеры информационных технологий

Классификация информационных технологий по назначению и характеру использования представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Классификация информационных технологий по назначению и характеру использования

- интернет-сайты для учебных целей;
- интернет-библиотеки для учебных целей;
- поиск множественной информации в различных сетях, базах данных для дальнейшего её использования, а также её хранение, накопление, обработка и передача;
- использование различного программного обеспечения и программных средств для проведения научных исследований и экспериментов;
- использование различного программного обеспечения и программных средств для тестирования обучаемых с целью определения их уровня знаний;
- использование текстовых редакторов;
- использование электронных носителей информации;
- использование мультимедийных и презентационных технологий;
- организация процесса дистанционного обучения;
- электронный обмен информацией и многое другое.

Вышеприведенные примеры использования информационных технологий в процессе обучения содействуют упрощению и повышению качества осуществления многих процедур образовательного процесса. Благодаря использованию информационных технологий в процессе обучения временные затраты на осуществление различных видов деятельности снижаются. Многие информационные технологии уже доказали свою пользу от использования их на практике и в системе образовательного процесса и в других сферах деятельности.

Поэтому использование информационных технологий позволяет повысить эффективность процесса обучения посредством достижения поставленной цели обучения и уменьшением различного рода затрат на проведение процесса обучения. При этом возникает вопрос при использовании каких информационных технологий можно достигнуть наибольшей эффективности.

При создании авторского программного продукта для обеспечения компетентности и осведомленности персонала в вопросах системного менеджмента необходимо принять во внимание специфику данной темы и учесть следующие аспекты:

- методологической составляющей данного программного продукта будут являться стандарты на различные системы менеджмента и при необходимости другая научно-методическая литература либо технические нормативные правовые акты в области технического нормирования и стандартизации, необходимые для обучения по вопросам системного менеджмента;

- наличие составляющей, связанной с практическим применением знаний в сфере системного менеджмента;

- возможность редактирования заложенных теоретических и практических основ программного продукта;

- простота использования программного продукта;

- и другие аспекты.

Повышение уровня компьютерной подготовки обучаемых, расширение и увеличение видов программных продуктов, использование информационных технологий в науке и образовании, являются одним из основных направлений совершенствования системы образования.

Литература

1. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь: СТБ ISO 9000-2015. – Введ. 01.03.16. – Минск: Госстандарт, 2015. – 60 с.

2. Толковый словарь Ушакова Д.Н.: толковый словарь в 4 т. / Д.Н. Ушаков. – М.: Гос. ин-т «Сов. энцикл.», 1935–1940. – 4 т.

3. Информационные технологии: учебник / Ю.Ю. Громов, И.В. Дидрих, О.Г. Иванова, М.А. Ивановский, В.Г. Однолько. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – 260 с.

УДК 371.3

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА ПО ВОПРОСАМ СИСТЕМОГО МЕНЕДЖМЕНТА КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБУЧЕНИЯ

Серенков П.С, Чурак Н.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

На данный момент существует большое количество трактовок термина «обучение», что свидетельствует о существующих проблемах в педагогической теории.

В связи с разнообразием трактовок, понятие обучение в основном рассматривается как: педагогический процесс; путь получения образования; овладение знаниями, умениями и навыками под руководством опытных лиц; как вид взаимодействия обучаемых и т.п.

Одно из основных и популярных пониманий термина «обучение» согласно [1]: обучение – основной путь получения образования, целенаправленный, планомерно и систематически осуществляемый процесс овладения знаниями, умениями и навыками под руководством опытных лиц – педагогов, мастеров, наставников и т. д.

Согласно [2] процесс обучения – педагогически обоснованная, последовательная, непрерывная смена актов обучения, в ходе которой решаются задачи развития и воспитания личности. В процессе обучения участвуют во взаимосвязанной деятельности его субъекты – учитель и ученик. Как элементы процесса обучения могут теоретически рассматриваться:

- цели и содержание образования;
- мотивы субъектов обучения;
- формы его организации;
- средства и результаты.

Взаимодействие названных элементов составляет механизм процесса обучения.

При этом качество процесса обучения заключается в наиболее полном достижении поставленной цели обучения.

Рассмотрим аспекты обучения персонала по вопросам системного менеджмента.

Согласно СТБ ISO 9000-2015 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь» [3]: компетентность – способность применять знания и навыки для достижения намеченных результатов.

Согласно [4]: осведомленность – наличие сведений, знаний о чем-нибудь.

Все существующие стандарты, устанавливающие модели систем менеджмента, в своей основе содержат требования к обеспечению компетентности и осведомленности персонала.

Кроме стандартов, содержащих требования к компетентности и осведомленности, действует СТБ ISO 10018-2015 «Менеджмент качества. Руководящие указания по обеспечению вовлеченности и компетентности персонала» [5], который содержит руководящие указания по связанным с человеком факторам, влияющим на вовлеченность и компетентность персонала, и создают ценность, что помогает достижению целей организации.

Согласно СТБ ISO 10018-2015 [5] факторы, воздействующие на вовлеченность и компетентность персонала:

- отношение и мотивация;
- осведомленность;

- коммуникации;
- творчество и инновации;
- образование и обучение;
- наделение полномочиями;
- привлеченность;
- лидерство;
- нетворкинг;
- признание и поощрение;
- рекрутинг;
- ответственность и полномочия;
- командная работа и сотрудничество.

Общая пригодность системы менеджмента качества и ее процессов зависит от вовлеченности компетентного и должным образом введенного и интегрированного в организацию персонала. Вовлеченность персонала важна для того, чтобы система менеджмента качества организации достигла выходов, согласующихся и увязанных с ее стратегиями и ценностями. Крайне важно идентифицировать, развивать и оценивать знания, навыки, поведение и рабочую среду, требуемые для результативного обеспечения вовлеченности персонала с необходимой компетентностью.

Стандарты на системы менеджмента качества, разработанные ISO/TC 176, основываются на принципах менеджмента качества, описанных в СТБ ISO 9000-2015 [3].

Взаимосвязь между СТБ ISO 10018-2015 [5] и СТБ ISO 9001-2015 [6] способствует обеспечению вовлеченности и компетентности персонала в рамках системы менеджмента качества. Однако СТБ ISO 10018-2015 [5] может также использоваться с другими системами менеджмента.

Эффективность процесса обучения заключается в наиболее полном достижении поставленной цели обучения при использовании минимальных затрат. Для повышения эффективности и качества процесса обучения рассмотрим понятие «автоматизация».

Автоматизация – одно из направлений научно-технического прогресса, использующее саморегулирующие технические средства и математические методы с целью освобождения человека от участия в процессах получения, преобразования, передачи и использования энергии, материалов, изделий или информации, либо существенного уменьшения степени этого участия или трудоёмкости выполняемых операций.

Автоматизации могут подвергаться:

- производственные процессы;
- проектирование;
- организация, планирование и управление;
- научные исследования;
- обучение;
- бизнес-процессы;
- и др. сферы человеческой деятельности.

Автоматизация позволяет повысить производительность труда, улучшить качество продук-

ции, оптимизировать процессы управления, отстранить человека от производств, опасных для здоровья.

Автоматизация, за исключением простейших случаев, требует комплексного, системного подхода к решению задачи. Применяемые методы вычислений иногда копируют нервные и мыслительные функции человека.

Весомым критерием для повышения качества процесса обучения является и автоматизация процесса обучения, подразумевающая создание наиболее благоприятных условий для проведения процесса обучения и повышения уровня знаний персонала с минимальными затратами.

При использовании средств автоматизации в процессе обучения имеют место следующие преимущества:

- возможность использования электронных средств отображения различной информации, необходимой для обучения;
- возможность исключения ведения бумажного учета – ведение электронного документооборота;
- возможность выбора любого месторасположения лиц, задействованных в процессе обучения;
- возможность обучения большого количества обучаемых с участием одного преподавателя, исключая проблемы, связанные с ограниченными размерами учебных аудиторий;
- возможность быстрого поиска информации в электронных базах данных;
- возможность использования электронных учебно-методических комплексов, пособий и др.;
- возможность быстрого и беспрепятственного редактирования электронного материала;
- мобильность средств автоматизации;
- возможность мобильного реагирования при взаимодействии преподавателя с обучаемыми;
- расширенные возможности самих средств автоматизации и другие преимущества.

В случае обучения персонала по вопросам системного менеджмента одной из составляющих такого обучения всегда является использование технических нормативных правовых актов в области технического нормирования и стандартизации (далее – ТНПА). При использовании электронной версии ТНПА можно воспользоваться такими преимуществами как: быстрый поиск необходимых аспектов в тексте ТНПА; чтение и работа с ТНПА с любого устройства, поддерживающего формат ТНПА; хранение большого количества различных ТНПА на электронном носителе информации; работа с несколькими ТНПА одновременно и др. В случае использования бумажного варианта ТНПА, необходимо тратить больше времени на работу с ТНПА и прилагать дополнительные усилия для наличия

ТНПА при себе. Вышесказанное является одним из примеров преимущества использования средств автоматизации на практике.

Естественно использование средств автоматизации имеет и определенные недостатки, но все они в основном связаны с некоторым набором факторов, которые можно подвергнуть определенному контролю для их исключения.

Таким образом материальные и временные затраты на проведение обучения с использованием средств автоматизации можно уменьшить. Поэтому использование средств автоматизации позволяет повысить качество процесса обучения.

Литература

1. Советский Энциклопедический Словарь. – М.: Сов. энциклопедия, 1984, с. 908.

2. Педагогика: конспект лекций. Е.В. Шарохина, О.О. Петрова, О.В. Долганова. Изд.: Эксмо, Москва, 2008.

3. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь: СТБ ISO 9000-2015. – Введ. 01.03.16. – Минск: Госстандарт: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2015. – 60 с.

4. Толковый словарь Ушакова Д.Н.: толковый словарь в 4 т. / Д.Н. Ушаков. – М.: Гос. ин-т «Сов. энцикл.», 1935-1940. – 4 т.

5. Менеджмент качества. Руководящие указания по обеспечению вовлеченности и компетентности персонала: СТБ ISO 10018-2015. – Введ. 01.03.16. – Минск: Госстандарт: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2015. – 28 с.

6. Системы менеджмента качества. Требования: СТБ ISO 9001-2015. – Введ. 01.03.16. – Минск: Госстандарт: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2015. – 36 с.

УДК 001.893:65.011.56:658.562

МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ МАСЛЯНЫХ НАСОСОВ РОТОРНОГО ТИПА С РЕГУЛИРУЕМОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ

Соколовский С.С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

При использовании регулируемых масляных насосов требуемое давление в системе обеспечивается путём изменения производительности насоса в зависимости от режима работы двигателя. Это достигается за счёт включения в конструкцию такого насоса подвижного статора и специальной регулировочной пружины, реагирующих на колебания давления масла в нагнетающей магистрали соответствующими изменениями объёма всасывающей полости.

За основу при разработке методического и инструментального обеспечения испытаний таких насосов на производительность был взят стенд и методика испытаний на производительность нерегулируемых масляных насосов шестерённого типа. Основная задача заключалась в воспроизведении при испытаниях реальных условий функционирования рассматриваемого объекта испытаний в составе системы смазки двигателя. Проведенный структурно-функциональный анализ исходного варианта испытательного стенда показал, что на его основе решить поставленную задачу без проведения кардинальной модернизации не представляется возможным. При испытаниях насосов на базе такого стенда их производительность определяется косвенным путём по результатам прямых измерений объёма прокачанного масла с использованием мерного резервуара со шкалой и времени прокачки с помощью обычного секундомера в условиях фиксированной частоты вращения приводного вала и давления в нагнетающей ма-

гистрале. Кроме того, что такие измерения выполнять весьма неудобно, им также характерно проявление большого количества специфических источников погрешности измерения (погрешность градуировки шкалы мерного резервуара, погрешность его формы, отклонение расположения, колебания температуры масла и пр.).

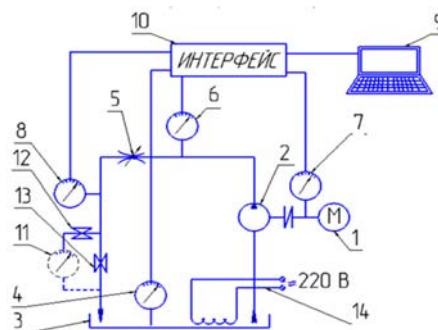


Рисунок 1 – Схема испытательного стенда (модернизированный вариант):

- 1 – электродвигатель; 2 – объект испытаний (масляный насос); 3 – резервуар (бак) с рабочей жидкостью (маслом); 4 – манометр; 5 – манометр; 6 – манометр; 7 – тахометр; 8 – объёмный расходомер; 9 – персональный компьютер; 10 – согласующий модуль (интерфейс); 11 – эталонный расходомер; 12 – кран К1; 13 – кран К2; 14 – нагревательный элемент (ТЭН)

С учётом проведенного анализа исходного варианта стенда и того, что подлежащие испытаниям насосы должны реагировать на изменения давления в нагнетающей магистрали, было принято

решение ввести в неё регулируемый дроссель с электромагнитным приводом и цифровой манометр, привод ведущего вала насоса осуществлять от двигателя постоянного тока с необходимым изменением частоты вращения его вала и контролем её с помощью стробоскопического тахометра, а измерения производительности насосов производить напрямую с использованием объёмного расходомера с цифровым отсчётом. Принципиальная схема модернизированного варианта испытательного стенда представлена на рисунки 1.

Важной особенностью данного варианта испытательного стенда является наличие отводной

магистральной и необходимых конструктивных элементов, обеспечивающих лёгкое встраивание в его конструкцию эталонного расходомера с целью проведения метрологической аттестации стенда. Такая конструкция стенда обеспечивает возможность автоматизировать как процесс испытаний масляных насосов выделенного типа, так и процесс метрологической аттестации стенда.

Литература

1. Орлов Ю.М. Объёмные гидравлические машины: конструкция, проектирование, расчёт // М.: Машиностроение, 2006. – 220 с.

УДК 001.893:65.011.56:658.562

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА БЕСКОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ

Соколовский С.С.¹, Алексиевич А.М.²

¹Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

²НПО «ФЕНОКС»

Минск, Республика Беларусь

В качестве объекта исследования выступает стенд для испытаний на долговечность жидкостных насосов, предназначенных для использования в системах охлаждения автомобильных двигателей. Суть таких испытаний состоит в прокачивании испытуемым насосом технологической жидкости регламентированной температуры по замкнутому контуру при определённом давлении и фиксированной частоте вращения вала насоса.

Как следует из методики испытаний, одним из функциональных параметров, определяемых при аттестации стенда, является температура технологической жидкости. Учитывая то, что такую температуру необходимо измерять в замкнутом закрытом контуре при функционировании стенда, было принято решение использовать бесконтактный метод измерения, реализуемый на базе инфракрасного пирометра «Нимбус-760». При этом возникла проблема минимизации методической погрешности измерения, связанной с тем, что такой прибор позволяет получать интегральную оценку температурного поля всего стенда, которое фактически весьма неоднородно. Очевидно, что температура технологической жидкости будет максимальной в зоне расположения нагревательных элементов и будет существенно отличаться в разных точках резервуара. Очевидно также то, что такую температуру необходимо измерять на входе в испытуемый насос.

Для минимизации рассматриваемой методической погрешности измерения было принято решение использовать лазерный указатель, установленный на пирометр, для более точного наведения входного отверстия пирометра в нужную точку измерения. Были проведены исследования,

суть которых состояла в измерении температуры жидкости в разных точках резервуара, равномерно распределённых по его объёму. Анализ экспериментальных данных показал, что неопределённость точки наведения такого пирометра может приводить к методической погрешности измерения температуры, составляющей около 6 °С, что является недопустимым. Второй проблемой было определение оптимального расстояния до объекта измерения. Для её решения было проведено дополнительное исследование, заключающееся в измерении температуры жидкости в выделенной контрольной точке на разном удалении пирометра от объекта измерения. Исследование показало, что минимальное значение погрешности измерения соответствует расстоянию от объекта измерения до пирометра от 0,5 до 1,5 метров.

Таким образом, согласно разработанной методике выполнения измерений температуру технологической жидкости требуется измерять в замкнутом закрытом контуре, в определённой его точке и при фиксированном расстоянии от точки измерения до пирометра. Очевидно, что несмотря на достаточно точное наведение пирометра на точку измерения (для этого предусмотрено использование специального лазерного указателя), на результат измерения температуры жидкости в этой точке будет также оказывать влияние инфракрасное излучение всего объекта, особенно его зон с наиболее высокой температурой (места расположения нагревательных элементов). Для оценивания возникающей из-за этого погрешности измерения было проведено следующее экспериментальное исследование.

С целью получения опорных значений температуры использовался жидкостной эталонный термометр. Учитывая невозможность непосредственного измерения температуры рассматриваемой жидкости таким термометром, было принято решение эксперимент проводить по следующей схеме.

Специальный сосуд, выполненный из такого же материала что и резервуар стенда, заполнялся жидкостью, аналогичной технологической жидкости стенда. Эту жидкость нагревали с помощью внешнего автономного нагревателя до температуры, превышающей верхний предел допустимого изменения температуры технологической жидкости стенда на 5 °С. Затем этот сосуд располагали на специальной подставке как можно ближе к месту расположения выделенной точки контроля температуры технологической

жидкости стенда. В процессе остывания жидкости в сосуде в момент достижения температуры, соответствующей верхнему пределу допустимого изменения температуры технологической жидкости стенда, отключались нагревательные элементы стенда и по ходу совместного остывания системы «сосуд-стенд» производилось одновременное измерение температуры жидкости в сосуде с помощью эталонного термометра и пирометра.

В результате проведенного исследования было установлено, что погрешность измерения температуры технологической жидкости в замкнутом трубопроводе рассматриваемого испытательного стенда бесконтактным методом с помощью инфракрасного пирометра не превышает 1,5 °С, что является вполне приемлемым в данном случае.

УДК 616-071

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМ ЗАХВАТА ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАРУШЕНИЙ ОСАНКИ У СТУДЕНТОВ БЕЛОРУССКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА Самохвал П.М., Бельский И.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Осанка – это важный показатель здоровья и физического развития, поскольку правильная осанка обеспечивает оптимальные условия для функционирования всех органов и систем организма. Тяжелые нарушения осанки, напротив, значительно снижают уровень жизненных сил и степень выносливости человека любого возраста.

Нарушение осанки с каждым годом становится все более и более распространенным явлением, причем оно очень сильно «молодеет». Согласно статистике Министерства здравоохранения Республики Беларусь, нарушение осанки наблюдается у 28 % детей в возрасте 7–9 лет, у 36 % детей 10–14 лет, а в возрасте 15–17 лет – уже более, чем у 41 %. Среди студентов вузов этот показатель достигает 90 % [1].

Широкая распространенность нарушений осанки требует разработки надежных и доступных методов диагностики состояния осанки у студентов ВУЗов для корректной работы в группах специальной медицинской группы и подготовительной группы по физической культуре.

В работе мы рассматриваем применение методики захвата движения, как одного из инновационных методов диагностики и коррекции нарушений осанки направленных на укрепление здоровья студентов средствами фитнеса.

Захват движения – это технология, позволяющая записывать не изображение, а только движения человека (или любого другого объекта) с помощью специальных отражающих маркеров и системы инфракрасных излучателей(камер), ко-

торые считывают отраженное излучение и передают эти данные в компьютер [2].

В качестве системы захвата движения использовалась система Qualisys. Система Qualisys состоит из 8 камер Qqus (7 камер захвата данных и одна видеокамера), подключенных к компьютеру, на котором происходит настройка камер, видеозахват данных и их последующая обработка. Камеры устанавливаются на штативах, которые минимизируют риск любого рода движений или вибраций. Также система имеет два блока питания. Один блок питания позволяет подключать до 4-х камер. Между собой камеры соединены кабелем для передачи данных. Схема подключения системы представлена на рисунке 1.

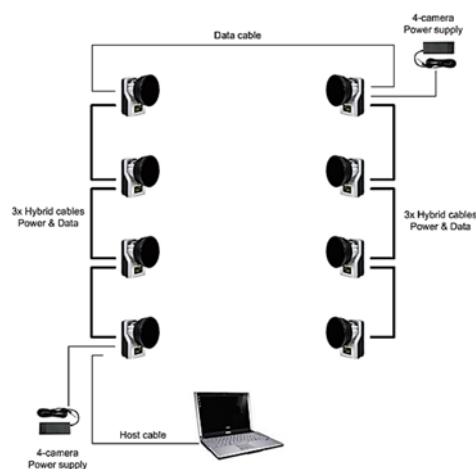


Рисунок 1 – Схема подключения системы Qualisys

В процессе работы на испытуемого при помощи двухстороннего скотча наносились световозражающие маркеры шарообразной формы диаметром 16 мм.

В качестве основных анатомических ориентиров были использованы следующие проекции костных образований (рисунок 2) [3]:

- 2 и 3 позвонок шейного отдела позвоночника;
- 4 и 5 позвонок шейного отдела позвоночника;
- 7-й шейный позвонок;
- 1-й позвонок грудного отдела позвоночника;
- 2-й позвонок грудного отдела позвоночника;
- 4-й позвонок грудного отдела позвоночника;
- 6-й позвонок грудного отдела позвоночника;
- 8-й позвонок грудного отдела позвоночника;
- 10-й позвонок грудного отдела позвоночника;
- 12-й позвонок грудного отдела позвоночника;
- 2-й позвонок поясничного отдела позвоночника;
- 4-й позвонок поясничного отдела позвоночника;
- 1-й позвонок крестцового отдела позвоночника;
- левая передне-верхняя ость подвздошной кости;
- правая передне-верхняя ость подвздошной кости;
- левая задне-верхняя ость подвздошной кости;
- правая задне-верхняя ость подвздошной кости;
- верхний угол правой лопатки;
- верхний угол левой лопатки;
- нижний угол правой лопатки;
- нижний угол левой лопатки;
- правый акромиальный отросток;
- левый акромиальный отросток;
- грудинный конец правой ключицы;
- грудинный конец левой ключицы;
- тело грудины в районе прикрепления третьего ребра;
- конец 7-го правого ребра;
- конец 7-го левого ребра;
- правый локтевой сустав;
- левый локтевой сустав;
- нижняя часть белой линии живота;
- линия талии справа;
- линия талии слева.

После захвата движения проводилась обработка данных в программной среде Qualisys

Track Manager, затем информация экспортировалась в Microsoft Excel, где проводилась окончательная обработка и построение математической модели позвоночника (в виде графика), производилось сравнение одинаково расположенных анатомических ориентиров [3]. Позвоночник рассматривался во фронтальной и в сагитальной плоскостях рисунок 3.

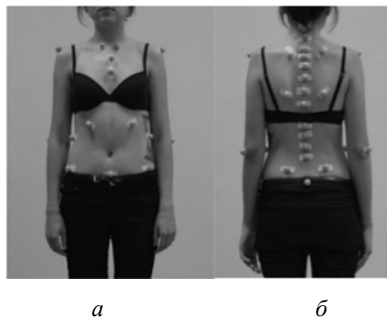


Рисунок 2 – Расположение маркеров на теле испытуемого:
а – вид спереди; б – вид сзади

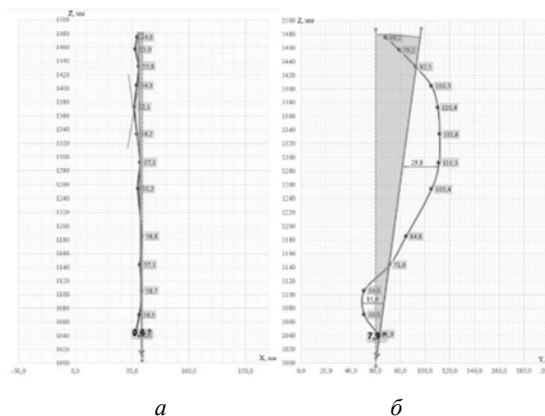


Рисунок 3 – Математическая модель позвоночника в двух плоскостях:
а – фронтальной плоскости;
б – сагитальной плоскости

Данная методика эффективна в оценке следующих характеристик:

- угловой характеристики отклонения линии гравитации от вертикали;
- величины изгибов позвоночного столба;
- оценки положения симметрично расположенных точек на теле человека во фронтальной плоскости;
- угла асимметрии этих точек;
- угла искривления позвоночника во фронтальной плоскости.

Совокупность полученных характеристик позволит судить о состоянии осанки студента.

Таким образом данная методика эффективна для оценки и коррекции состояния осанки у студентов. Главным преимуществом этой методики является использование полученных данных для выстраивания корректных индивидуальных программ занятий, которые будут направлены на

исправление тех нарушений которые встречаются у обследуемого. Использование данной методики совместно с разработкой индивидуальной программы занятий позволяет удовлетворить личностные запросы студента, повысить мотивацию к посещению занятий и к занятию двигательной активностью, что положительно сказывается на здоровье в целом.

Помимо этого применение систем видеозахвата имеет ряд преимуществ, в сравнении с существующими методиками оценки состояния осанки (экспертная оценка, рентгенография, компьютерная томография, магнитно-резонансная томография и др.):

- отсутствие потенциально опасной радиации;
- диагностика эффективна в выявлении нарушений осанки;
- высокая точность измерений (погрешность не более 1 мм);

- отсутствуют требования к хорошему освещению помещения;
- простота в обращении.

Литература

1. Скиндер Л.А. Физическая реабилитация детей с нарушениями осанки и сколиозом: учеб.-метод. пособие / Л.А. Скиндер [и др.]; под общ. ред. Л.А. Скиндер. – Брест. гос. ун-т имени А.С. Пушкина. – Брест: БрГУ, 2012. – 210 с.
2. Лукашевич В.А. Диагностические методы адаптивной кинезитерапии: видео анализ девиаций тазового региона как метод объективизации специфических механизмов поддержания статической позы / В.А. Лукашевич [и др.] // Инновационные технологии в медицине. – 2015. – № 4 (7). – С. 10–21.
3. Бонев Л. Руководство по кинезотерапии / Л. Бонев. – София: Медицина и физкультура, 1978. – 357 с.

УДК 006.90.03.03

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ, НЕ ПРЕОБРАЗУЮЩИХ СИГНАЛ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Цитович Б.В.¹, Соломахо В.Л.²

¹Белорусский государственный институт повышения квалификации
по стандартизации, метрологии и управлению качеством
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Для обеспечения единства измерений необходимо не только нормативно установить единицу и/или шкалу физической величины, но и с достаточной точностью воспроизводить её всеми применяемыми средствами измерений (СИ). Специально для этого разработаны такие метрологические мероприятия, как поверка СИ и калибровка СИ с последующей верификацией. Самыми удобными для таких мероприятий СИ являются однозначные меры – простота конструкции позволяет наиболее экономично добиться при их изготовлении требуемой точности. Поэтому меры очень широко используют при поверке любых СИ.

Мера (материальная) – средство измерений, которое воспроизводит в процессе использования или постоянно хранит одну величину или более с приписанными им значениями.

Главная отличительная особенность меры – отсутствие преобразований сигнала измерительной информации самим средством измерений.

Меры, предназначенные для воспроизведения физической величины одного заданного размера (одной ступени шкалы), называют однозначными, а воспроизводящие физические величины ряда размеров (несколько ступеней шкалы) – многозначными. Некоторые многозначные меры предназначены для непосредственного воспроиз-

ведения определённого участка шкалы физической величины (линейка, транспортир, измерительный сосуд). Такие меры называют штриховыми, поскольку шкала обычно выполнена с отметками в виде штрихов.

Мера, выполненная в виде конкретного физического объекта, может быть предназначена для хранения физической величины заданного размера (ряда размеров). Такая мера должна сохранять величину с высокой точностью на протяжении длительного отрезка времени. Возможные изменения исходного размера физической величины при хранении и использовании такой меры связано с различными физическими явлениями (взаимодействие с окружающими физическими полями, старение материалов физического объекта-носителя величины, воздействия на меру при её использовании по назначению).

Мера может быть физическим объектом, который не хранит физическую величину заданного размера, а воспроизводит её при определённом воздействии на него. К таким мерам можно отнести камертон (мера частоты колебаний), песочные часы (мера длительности отрезка времени), эталонные меры энергии сгорания (меры удельной энергии сгорания на основе твердых или жидких веществ, меры объемной энергии сгорания на основе газообразных углеводородов

или природного газа). Последние меры одноразово воспроизводят величину («порционно потребляемые меры»).

Такие меры требуют дополнительных энергетических затрат для воспроизведения физической величины заданного размера. Полученная мерой энергия используется для создания (воспроизведения) сигнала измерительной информации (физической величины заданного размера) самим средством измерений. Полученный сигнал измерительной информации может быть использован для настройки прибора на начальную отметку шкалы, для настройки технологического оборудования, для измерений методом сравнения с мерой с применением прибора сравнения (компаратора).

Рассмотренные меры, хранящие и/или воспроизводящие физические величины заданных размеров, представляют собой специально разработанные и изготовленные изделия (физические тела или изделия более сложных конструкций). Их можно разделить на «эксплуатируемые» и «потребляемые». При идеальном использовании «эксплуатируемой меры» по назначению она сохраняет приписанное ей свойство – физическую величину заданного размера. Реальное использование такой меры связано с уменьшением её ресурсов. В отличие от неё «потребляемые меры» при их использовании частично или полностью «уничтожаются», например, сжигаются для получения спектральной характеристики состава. После такого использования соответствующая часть начального физического объекта разрушается и более не является носителем физической величины заданного размера.

От мер, которые «воспроизводят в процессе использования или постоянно хранят величины приписанных значений» принципиально отличаются меры, предназначенные для индикации достижения определённой физической величины заданного размера. Отличие настолько существенно, что основные признаки таких мер даже не попали в стандартное определение мер.

Такая мера (физическое тело, изделие) не хранит и не воспроизводит нужную нам величину, а только фиксирует (подтверждает, сигнализирует) достижение воздействующей на неё физической величиной определённого значения. Такие устройства называют индикаторами или детекторами.

Генерируют (воспроизводят) интересующую нас физическую величину вспомогательные устройства (например, температурная камера). По результатам использования температурных индикаторов создают шкалу, которую строят по реперным точкам. «Меры-индикаторы» сигнализируют о достижении определённой температуры нагреваемой или охлаждаемой среды. Наиболее известным примером является температурная шкала Цельсия (индикаторное вещество – вода,

вспомогательное устройство – камера тепла и холода).

«Меры-индикаторы» работают как средства контроля достижения (пересечения) определённой ступени шкалы физической величиной, воспроизводимой специально созданным вспомогательным устройством, без которого такие меры неработоспособны.

Общими для всех этих мер являются

– принадлежность к определённому классу средств измерений (к мерам);

– общность целевого использования (для воспроизведения сигнала измерительной информации, соответствующей одной ступени шкалы или ряду ступеней, без преобразования измерительной информации);

– одинаковость нормируемых метрологических характеристик (номинальные значения и характеристики погрешности).

Представленная классификация обладает достаточной общностью для распространения на однозначные и многозначные меры физических величин и не ограничивает возможности создания других классификаций.

Если мера предназначена для воспроизведения одной ступени шкалы – это однозначная мера, а если для воспроизведения ряда ступеней шкалы (ряд одноименных физических величин) – многозначная мера. Многозначная мера конструктивно может представлять собой механическое объединение однозначных мер или средство измерений со шкалой в явном виде (штриховая мера). Штриховые меры длины (линейки, рулетки), штриховые меры угла (транспортиры), штриховые меры объёма (измерительные сосуды со шкалами) широко известны, поскольку распространены в быту.

Нормируемые метрологические характеристики штриховых многозначных мер кроме номинальных значений и характеристик погрешностей воспроизведения дополняют ещё рядом характеристик, непосредственно связанных со шкалой (в частности, пределы шкалы, диапазон шкалы, цена деления и длина деления шкалы). Диапазон измерений и связанные с ним метрологические характеристики, необходимые для приборов, к штриховым многозначным мерам не применяют.

Единичные однозначные меры как недостаточно удобные для решения большинства производственных задач применяют сравнительно редко, поскольку предпочтительно использовать комплекты таких мер. Из отдельных мер комплектуют наборы или их конструктивно объединяют в так называемые «магазины мер».

Существуют достаточно сложные меры, которые могут характеризоваться не одной физической величиной, а рядом физических величин, как однотипных, так и разнотипных. Например, сложными мерами, предназначенными для вос-

произведения ряда различных геометрических параметров, являются «образцы шероховатости поверхностей», эталонные зубчатые колеса, резьбовые калибры и др. Так называемые «стандартные образцы» свойств или состава веществ и материалов также являются мерами, которые предназначены для воспроизведения некоторого заданного набора определённых значений физических величин. В частности, стандартные образцы состава вещества (материала) с приписанными им при аттестации значениями величин (относительными долями компонентов), являются мерами состава.

УДК 620.179.1:534.1

О ВОЗБУЖДЕНИИ ВОЛН ЛЭМБА БЕСКОНТАКТНЫМИ СПОСОБАМИ

Баев А.Р.¹, Майоров А.Л.¹, Митьковец А.И.², Бурнос А.В.¹, Гиль Н.Н.¹

¹Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

²Институт физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Один из путей повышения эффективности неразрушающего контроля (НК) физико-механических свойств материалов и наличия в них дефектов состоит в использовании бесконтактных способов и средств излучения и (или) приема упругих мод – волн Лэмба (ВЛ) [1]. Анализ современного состояния акустического контроля показывает, что наиболее перспективными являются комбинированные способы прозвучивания объектов, включая: варианты: I – ПЭП ↔ ЭМАП и ЭМАП → ЭМАП; II – ОАП → ПЭП; III – ОАП → ЭМАП, где ПЭП – контактный пьезопреобразователь, ЭМАП – электромагнитоакустический преобразователь, а ОАП – оптоакустический преобразователь. Ниже представлены результаты экспериментальных исследований, посвященных выявлению особенностей возбуждения-приема ВЛ согласно указанным вариантам измерений – I и II.

Вариант I. В данном случае акцентируется внимание на исследовании магнитострикционного механизма возбуждения ВЛ и их приема согласно представленным на рисунке 1 схемам прозвучивания – при наличии механических напряжений σ и воздействия постоянного намагничивающего поля напряженностью \bar{H} , направленного тангенциально поверхности образцов. Отметим, что в эксперименте используются ЭМАП с замкнутой на ферромагнитную пластину катушкой индуктивности для излучения-приема переменного поля (рисунок 1, а и 1, б). Согласно рисунку 1, в ЭМАП содержится в корпусе поляризованный тангенциально рабочей поверхности постоянный магнит, на обеих сторонах которого (полюсах) расположены ферромагнитные магнитопроводы, один из которых

Рассмотренные особенности применения мер для воспроизведения или индикации физической величины заданного размера позволяют распределить их на три группы:

- носители величины определённого размера;
- генераторы величины определённого размера;
- индикаторы достижения определённого размера величины, генерируемой вспомогательными устройствами.

Принадлежность мер к определённой группе определяет возможности их использования и поверки.

играет роль концентратора магнитного потока, замкнутого на витки катушки индуктивности ЭМАП. Исследование зависимостей амплитуд сигналов от величины растягивающих напряжений $E^*(\sigma, H) = E/E_0$ проведено путем прозвучивания объекта согласно указанным выше схемам.

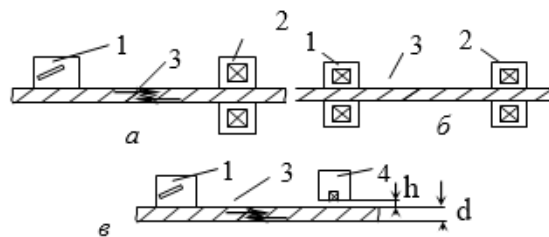


Рисунок 1 – Схемы исследования влияния механических напряжений на возбуждение и прием волн Лэмба в пластине с использованием контактных и ЭМА преобразователей с замкнутой на пластину катушкой индуктора (а, б) и разомкнутой (в):

1 – ПЭП, 2, 4 – ЭМА преобразователи

Вариант II. Возбуждение волн Лэмба осуществляется путем воздействия импульсного излучения, генерируемого лазером с длиной волны 1,06 мкм, на металлическую пластину толщиной 0,75 мм (рисунок 2). Форма пятна излучения, воздействующего на поверхность объекта круг радиусом $r \approx 2,5$ мм. Временная форма импульса подобна колоколу, а его длительностью $\tau \approx 20$ нс. В результате термоупругого эффекта генерируются колебания частиц среды, преобразующиеся в волны Лэмба. Они принимаются ПЭП с углом призмы $\beta = \arcsin(C_{\text{п}}/C_{\text{л}})$, от которого зависят оптимальные условия приема симметричной (s) или асимметричной (a) моды. Им соответствует безразмерное волновое число

$k^* = 2\pi d/C_L$, где C_1 и C_L скорости УЗК в призме ПЭП и моды в пластине. В результате проведенных исследований согласно вариантам I и II установлено следующее.

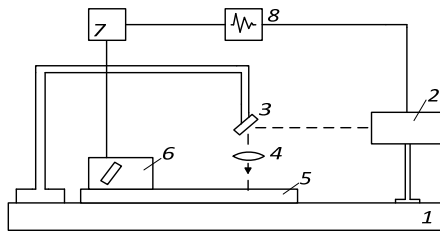


Рисунок 2 – Схема исследования возбуждения волн Лэмба ОА-методом и приема их призматическим ПЭП: 1 – опора; 2–4 – лазерная установка; 5 – металлическая пластина; 6 – ПЭП; 7 – приемник сигнала с ПЭП; 8 – осциллограф

1. В случае воздействия на ферромагнитную пластину растягивающих механических напряжений в широком диапазоне σ до 200–300 МПа и при реализации схем прозвучивания ПЭП \leftrightarrow ЭМАП и ЭМАП \rightarrow ЭМАП, преобладающим является магнитострикционный механизм – прямой и обратный (рисунок 1, а и б). Зависимости $E(\sigma)$, полученные для фиксированных значений напряженностей магнитного поля $H_{\uparrow} \in \{H_{\uparrow}, H_{\downarrow}\}$ на частоте $f = 1,25$ МГц могут быть преимущественно аппроксимированы квазилинейными функциями в диапазоне $\sigma = 0\text{--}200$ МПа. При этом относительное изменение (рост) сигнала $E^* = E/E_0$ может достигать 2–3 раза и более. Характерным является тот факт, что чувствительность рассматриваемых схем измерений к вариации σ имеет характерный оптимум, определяемый ходом кривой магнитострикции $\Lambda(H)$ при $0 < H < H_{\max}$. На рисунке 3б показана возможность оценки величины σ в широком диапазоне ее изменения при использовании схемы прозвучивания объекта ЭМАП \rightarrow ПЭП. При этом катушка индуктивности расположена в корпусе ЭМАП, находящегося на расстоянии от объекта $d=1$ мм. Как показал проведенный анализ, существенное изменение приведенных на рисунке 3а зависимостей может быть объяснено конкуренцией магнитострикционного и лоренцевского механизма в формировании сигнала отклика $E = E(\bar{H}_{L\dot{a}}, \bar{H}_{sr\dot{a}})$. Причем лоренцевский механизм, определяемый электропроводностью материала γ и величиной нормальной составляющей магнитного поля $\bar{H}_{L\dot{a}}$, наиболее существенно проявляется при $h \rightarrow 0$ и реализации схемы прозвучивания ПЭП \rightarrow ЭМАП. Показано, что данные исследований представляют интерес для совершенствования методик оценки величины механических напряжений не только для контроля пластинчатых материалов, но и объемных тел с помощью головных волн.

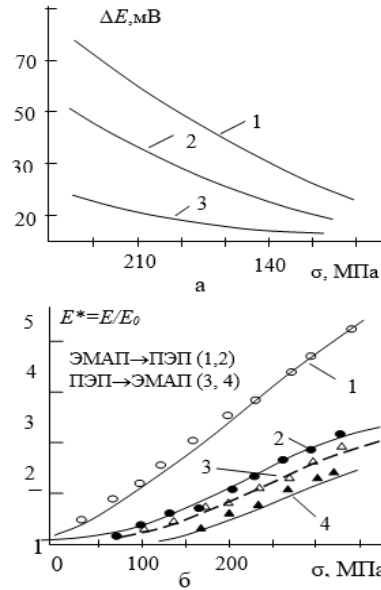


Рисунок 3 – Влияние механических напряжений на амплитудные параметры волн Лэмба при использовании ЭМАП с замкнутой (а) и разомкнутой относительно пластины (б) катушкой индуктивности:

а – разность сигналов $=E_{\uparrow} - E_{\downarrow}$, измеренных на восходящей E_{\uparrow} и нисходящей E_{\downarrow} ветви зависимости $E(H)$ при характерных напряженностях H_{\uparrow} и H_{\downarrow} , соответствующих $\Delta E=0$ и $\sigma=0$; $E/E_{\max}=0,2$ (5); 0,4 (6); 0,8 (7); б – амплитуда ВЛ при высоте расположения ЭМАП над пластиной $h=0$ (2, 3) и 1 мм (1, 4)

2. Апробация комбинированного ОА метода показали его высокую эффективность для возбуждения не только нулевой симметричной s_0 моды, но и других мод, которые могут быть использованы для изучения физико-механических свойств пластинчатых материалов и определения в них дефектов. Для указанных выше условий эксперимента (рисунок 2) установлен ряд особенностей, связанных с существенным влиянием угла призмы ПЭП β на принимаемые моды ВЛ и чувствительность измерительной схемы к выявлению дефектов. В частности показано, что при приеме s_0 моды преобразователем с углом призмы $\beta_1 = 27$ град., в пластине генерируется не только самая быстрая s_0 мода с частотой, близкой к собственной частоте ПЭП ($f_0 = 1,15$ МГц), но и сопутствующая мода с частотой $f_c \approx 3f_0$ и меньшей скоростью распространения. Ее амплитуда E_c превышает амплитуду s_0 моды E_{s_0} практически в 1,5–2 раза. Кроме того обнаружено, что величина E_c изменяется на 13–15 дБ и более при наличии искусственного дефекта в виде тонкой прорези, выполненной с обратной стороны пластины высотой $b \approx 250\text{--}300$ мкм. Изменение же амплитуды s_0 моды не превышает 1–2 дБ. На основе анализа оптоакустического тракта дана трактовка указанным и другим особенностям

возбуждения и распространения волн Лэмба при изменении геометрии пятна лазерного луча, угла приема волн β и высоты дефекта.

Литература

1. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т.: под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение. – Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов [и др.] – 2003. – 864 с.

2. Мужикский В.Ф., Комаров В.А. Особенности электромагнито-акустического преобразования при наличии механических напряжений. I. Приложенные напряжения: экспериментальные данные. Дефектоскопия, №5, 2005. – С. 81–92.

3. Петров Ю.В., Гуревич С.Ю., Голубев Е.В. Экспериментальное определение параметров волн Лэмба при их лазерной генерации. Дефектоскопия, №3, 2010 – С. 45–49.

УДК 621.396.67

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ КОМПАКТНОГО ПОЛИГОНА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫХ СИСТЕМ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

Будай А.Г., Гринчук А.П., Громыко А.В.

*Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ
Минск, Республика Беларусь*

В лаборатории прикладной электродинамики НИИПФП БГУ в рамках выполнения НИР разработан и реализован на практике универсальный компактный антенный полигон для измерения характеристик различных типов антенных систем.

При выполнении проекта впервые в республике Беларусь:

- поставлена задача, проведена разработка и создан реально действующий экспериментальный образец компактного антенного полигона, – универсальный инструмент для комплексного анализа полей излучения максимального количества типов антенных систем [1];

- образец компактного полигона включает в себя взаимно увязанные экспериментальные образцы радиоголографических измерительных комплексов с планарным и сферическим сканированием [2, 3];

- разработан алгоритм и создано специальное ПО для расчета структуры поля излучения антенной системы на сферической поверхности любого физически реализуемого радиуса (в том числе и в дальней зоне), по результатам измерения амплитудно – фазового распределения поля излучения на поверхности измерения с использованием процедуры БПФ.

Существенным преимуществом разработанного компактного полигона является его универсальность, поскольку в отличие от отдельных стендов, с его помощью могут измеряться характеристики любых типов антенн – слабонаправленных и апертурных антенн, формирующие узкие лепестки диаграмм направленности.

Кроме того в процессе выполнения проекта разработано универсальное программное обеспечение, позволяющее решать следующие задачи анализа структуры полей излучения:

- обрабатывать (вводить в компьютер и преобразовывать результаты измерения (ампли-

туда – фаза или квадратуры), визуализировать их как в одномерном (графики), так и двумерном формате (аксонометрия, картография);

- рассчитывать структуру поля излучения антенных систем на соответствующих поверхностях (плоскость – плоскость, сфера – сфера), расположенных на любом расстоянии от поверхности измерения, в том числе в промежуточной и дальней зонах (диаграмма направленности), а также решать задачу обратной дифракции, т.е. рассчитывать структуру поля в непосредственной близости от излучающего раскрыва, в том числе и в апертуре антенны;

- анализировать структуру полей сложных излучающих систем типа антенна – рассеиватель, антенна – обтекатель, антенна – укрытие (антенна – экран), локализовывать место расположения рассеивателей и определять степень влияния укрывающих конструкций на характеристики антенной системы по сравнению с характеристиками свободной антенны.

Также разработаны комплексные методики оценки погрешностей восстановления дальнезонных характеристик антенн по результатам измерения на изготовленных экспериментальных образцах радиоголографических измерительных комплексов, отличительной особенностью которой является использование только экспериментальных результатов, полученных на данном стенде, что не накладывает никаких предварительных ограничений на величины и законы распределения погрешностей. В предложенной оценке максимально учтены все механизмы формирования погрешностей, причем оценка дается в комплексе, а не по отдельным параметрам (например, погрешность позиционирования или отклонения от поверхности измерения). Предложенная оценка позволяет реально оценить динамический диапазон восстанавливаемых дальнезонных характеристик при заданной вели-

чине погрешностей измерения. Анализ большого количества экспериментальных результатов измерения и расчета характеристик различных типов антенн позволил объективно утверждать, что созданные экспериментальные образцы измерительных комплексов позволяют с приемлемой точностью восстанавливать характеристики антенн в динамическом диапазоне до -40 дБ [4].

Поскольку компактный полигон включает два типа измерительных стендов, разработана методика комплексного тестирования такого полигона, позволяющая оценить его погрешности, как



Рисунок 1

Для практической реализации указанной методики в качестве испытательных антенн взяты классический рупор, имеющий размеры излучающей апертуры 195x145 мм и фрагмент синфазной антенной решетки размером 8x8 излучателей. В докладе последовательно представлены результаты измерений и расчетов в соответствии с приведенной методикой для каждой из антенн. Анализ результатов показывает, что структуры полей, измеренных на сфере и восстановленных из дальней зоны в целом совпадают как по амплитуде, так и по фазе. Более явно совпадение (или различие) проявляется при рассмотрении сечений. При сравнении результатов прямых измерений на сфере и восстановленных при расчетах из дальней зоны необходимо учитывать, что на степень совпадения влияют все возможные механизмы формирования погрешностей как случайного, так и систематического характера обоих измерительных стендов. Если при анализе погрешностей восстановления дальнезонных характеристик для каждого стенда рассматривались только случайные составляющие погрешностей, поскольку эталонных полей не существует, то при таком сравнительном анализе должно проявиться и влияние систематических погрешностей. На наш взгляд, указанные влияния могли бы проявиться в искажениях типа

единого измерительного комплекса. Структура методики приведена на рисунке 1.

Следует отметить, что методика в усеченном виде (на уровне сравнения диаграмм направленности) многократно использовалась в ходе сравнительных измерений. Добавление последних блоков существенно расширяет возможности методики и позволяет не только оценить влияние аппаратных частей комплексов, но и задействовать в единой вычислительной процедуре практически все алгоритмы и программы преобразования полей.

аббераций на периферийных участках поверхностей измерения. Возможно, такие проявления имеют место, однако для получения достоверных результатов необходимо проведение отдельного анализа, что требует выполнения большого объема экспериментальных измерений. По результатам проведенных экспериментов можно заключить, что в угловом секторе около 90 градусов в направлении главного прожекторного луча совпадение хорошее. Различия составляют не более 3 дБ на уровне -25 дБ.

Главный результата применения разработанной методики состоит в том, что реализованный компактный полигон действительно представляет собой единый инструмент, адекватно измеряющий и анализирующий структуры полей излучения вне зависимости от способа их измерения и обработки.

Литература

1. Будаев А.Г. Разработка концепции построения аппаратно-программного комплекса модульной конструкции для определения характеристик антенных систем по измерениям в ближней зоне / А.Г. Будаев, А.П. Гринчук, А.В. Громыко // Приборы и методы измерений. 2017 – № 2 – С.151–159.
2. Будаев А.Г. Практическая реализация аппаратно-программного комплекса для планарных измерений

характеристик антенн в ближней зоне / А.Г. Будаи, А.П. Гринчук, А.В. Громыко // Приборы и методы измерений. 2017, № 4. – С. 334–343.

3. Будаи А.Г. Практическая реализация радиолокационного аппарата – программного комплекса со сферическим сканированием / А.Г.Будаи, А.П. Гринчук, А.В. Громыко // Материалы 11-й Международной

научно-технической конференции «Приборостроение – 2018», Минск, 14–16 ноября 2018. – С. 123–124.

4. Будаи А.Г. Применение статистических методов для оценки метрологических характеристик голографических измерительных комплексов / А.Г. Будаи, А.П. Гринчук, А.В. Громыко // Приборы и методы измерений. 2018, т. 9, № 2. – С. 151–159.

УДК 621.317.7.089.68(476)

**МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ЕДИНИЦЫ
ОСЛАБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ**
Гуревич В.Л.¹, Серенков П.С.², Волюнец А.С.¹, Толочко Т.К.¹, Ермакович А.В.¹

¹Белорусский государственный институт метрологии
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Одной из измеряемых характеристик на высоких и сверхвысоких частотах является уровень потерь электромагнитной энергии, передаваемой через пассивные радиотехнические устройства, который характеризуется ослаблением.

Для обеспечения метрологического контроля средств измерений ослабления электромагнитных колебаний в Республике Беларусь в 2014 году был создан Исходный эталон единицы ослабления электромагнитных колебаний ИЭ РБ 24-18. После проведения исследований, в 2018 году этот эталон был утвержден в качестве Национального эталона единицы ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 0 до 37,5 ГГц НЭ РБ 44-18.

Национальный эталон единицы ослабления электромагнитных колебаний представляет собой программно-аппаратный комплекс, в состав которого входят:

- управляющая ПЭВМ;
- генератор сигналов Agilent E8257D;
- установка эталонная единицы ослабления в диапазоне частот от 0 до 30 МГц ЭО-1;
- приемник измерительный VM7; частотные конверторы Tegan 8852 и Tegan 8853, используемые в диапазоне частот от 30,0 МГц до 18,0 ГГц и от 18,0 ГГц до 37,5 ГГц соответственно;
- комплекты коаксиальных переходов, прецизионных аттенуаторов, согласующих устройств, кабелей СВЧ и интерфейсных кабелей.

Эталон обеспечивает воспроизведение и передачу единицы ослабления в диапазоне частот от 0 до 37,5 ГГц, разбитых на три поддиапазона:

- 1-ый поддиапазон от 0 до 30 МГц;
- 2-ой поддиапазон от 30 МГц до 18 ГГц;
- 3-ий поддиапазон от 18 до 37,5 ГГц.

Для метрологического контроля эталона необходимо обеспечить метрологическую прослеживаемость результатов измерений до единиц Международной системы (СИ).

Метрологическая прослеживаемость результатов измерений представляет собой ключевой вопрос для обеспечения доверия к результатам измерений и их сопоставимости, как на национальном, так и на международном уровне.

Обеспечить метрологическую прослеживаемость до единиц величин Международной системы единиц (СИ) можно несколькими способами.

Один из способов это поэлементное исследование эталона. Но в этом случае есть риск того, что либо появятся, либо не будут учтены некоторые влияющие факторы, которые приведут к увеличению неопределенности при калибровке.

Другой способ, это проведение калибровки на вышестоящем эталоне. Для осуществления данного способа необходимо оборудование, входящее в состав эталона, доставить в страну хранения вышестоящего эталона, что является процессом довольно затруднительным и экономически не выгодным, а также может привести к повреждению оборудования в процессе перевозки.

Третьим способом обеспечения метрологической прослеживаемости результатов измерений является участие в межлабораторных сличениях. В рамках КООМЕТ в 2014 году БелГИМом была предложена тема «Дополнительные сличения эталонов единицы ослабления электромагнитных колебаний» (КООМЕТ 643/ВУ/14). Тема в качестве предлагаемой была включена в программу сличений, но из-за отсутствия заинтересованных участников не была реализована и аннулирована в 2019 году.

Для решения заданной задачи был выбран путь, который включал в себя анализ источников неопределенности, создание математической модели измерений, разработку методики калибровки.

Анализ показал, что среди источников неопределенности измерений при воспроизведении и передаче единицы ослабления электромагнит-

ных колебаний можно выделить следующие доминирующие составляющие:

- неопределенность, обусловленная погрешностью измерений ослабления на промежуточной частоте;
- неопределенность, обусловленная нелинейностью входных цепей;
- неопределенность, обусловленная наличием паразитных связей и шумов;
- неопределенность, связанная с рассогласованием ВЧ тракта.

Для определения составляющей неопределенности, связанной с погрешностью измерений на промежуточной частоте, было предложено осуществить передачу единицы ослабления на промежуточной частоте от эталона Российской Федерации ГЭТ 193-2011 посредством использования эталона-переносчика, в качестве которого выступил прибор для поверки аттенуаторов ступенчатый Д1-25.

Модель измерений погрешности эталона на промежуточной частоте представлена формулой (1).

$$\Delta_A = A_{изм} - A_{эт} + \Delta_{кв}, \text{ дБ}, \quad (1)$$

где Δ_A – погрешность измерения ослабления, дБ; $A_{изм}$ – показание приемника ЭО-1 или VM-7 эталона, дБ; $A_{эт}$ – действительное значение ослабления эталона - переносчика Д1-25, дБ; $\Delta_{кв}$ – поправка из-за конечного разрешения приемника ЭО-1 или VM-7 эталона, дБ.

Для оценивания составляющей неопределенности эталона из-за нелинейности ВЧ-тракта были проведены экспериментальные исследования, в ходе которых выполнялись измерения ослабления одного и того же аттенуатора при различных уровнях сигнала.

При измерении больших значений ослабления (100 дБ и выше) необходимо учитывать составляющую неопределенности эталона из-за паразитных связей и шумов. Для этого были проведены экспериментальные исследования, в ходе которых выполнялись измерения одной и той же величины ослабления аттенуатора при постоянном уровне и различных частотах сигнала на выходе генератора.

Составляющая неопределенности из-за рассогласования определяется параметрами согласования аттенуатора и учитывается при измерениях в диапазоне частот от 10 МГц.

Модель измерения для воспроизведения и передачи единицы ослабления электромагнитных колебаний от эталона к средствам измерения ослабления, представлена формулой (2).

$$A_{СИ} = A_{изм} + \Delta_{пч} + \Delta_{нф} + \Delta_{сф} + \Delta_{рас}, \text{ дБ} \quad (2)$$

где $A_{СИ}$ – действительное значение ослабления средства измерения, дБ; $A_{изм}$ – показание приемника ЭО-1 или VM-7, дБ; $\Delta_{пч}$ – составляющая неопределенности, обусловленная неточностью приемника ЭО-1 или VM-7 на промежуточной частоте, дБ; $\Delta_{нф}$ – составляющая неопределенности, обусловленная нелинейностью ВЧ-тракта, дБ; $\Delta_{сф}$ – составляющая неопределенности, обусловленная наличием паразитных связей и шумов (учитывается при измерении ослабления 100 дБ и выше), дБ; $\Delta_{рас}$ – составляющая неопределенности, обусловленная рассогласованием (учитывается при измерении в диапазоне частот от 10 МГц), дБ.

Схема метрологической прослеживаемости единицы ослабления электромагнитных колебаний представлена на рисунке 1.

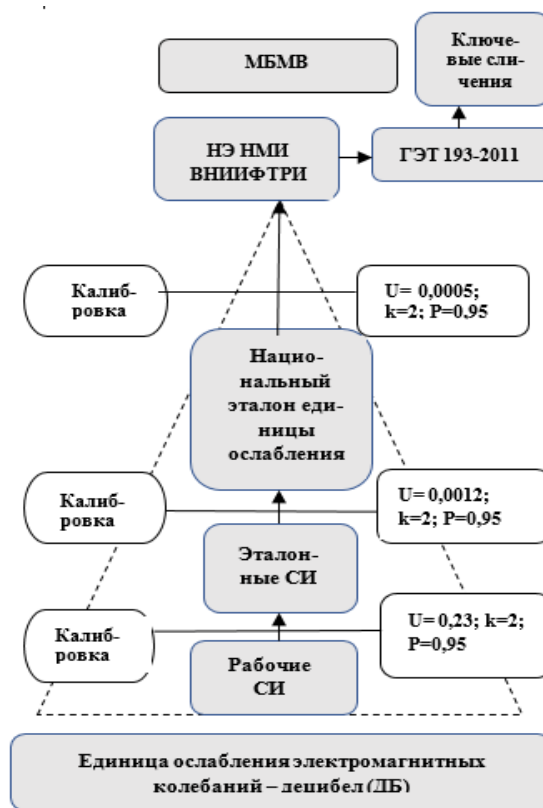


Рисунок 1 – Схема метрологической прослеживаемости единицы ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 0 до 37,5 ГГц

Эталон обеспечивает воспроизведение и передачу единицы ослабления электромагнитных колебаний с неисключенной систематической погрешностью от $5 \cdot 10^{-4}$ до 0,24 дБ. Среднее квадратическое отклонение результатов измерений составляет от $2 \cdot 10^{-4}$ до 0,02 дБ, с расширенной неопределенностью от $2 \cdot 10^{-4}$ до 0,11 дБ.

УДК 621.7,620.186

СТРУКТУРА И УДЕЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТНАЯ ЭНЕРГИЯ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПЛЕНОКЛапицкая В.А.^{1,2}, Кузнецова Т.А.^{1,2}, Хабарова А.В.¹, Трухан Р.Э.¹, Чижик С.А.^{1,2}, Торская Е.В.³¹ *Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь*² *Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*³ *Институтом проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН
Москва, Российская Федерация*

Широкое распространение покрытий на основе углерода объясняется как их свойствами, такими как химическая инертность и биосовместимость, так и возможностью за счет выбора технологии нанесения и различного типа добавок обеспечивать необходимые механические свойства и степень сцепления с подложкой. В области трибологии используются как износостойкие алмазоподобные (DLC) покрытия, так и покрытия на основе графита, обеспечивающие низкие значения коэффициента трения в паре с различными контртелами в условиях сухого трения.

Целью работы являлось изучение морфологии и удельной поверхностной энергии алмазоподобных пленок методом атомно-силовой микроскопии. Известна важность адгезионных сил на трибологических поверхностях микроустройств [1].

Образцы алмазоподобных (DLC) покрытий наносили на сталь марки ШХ15 методами лазерной абляции (Pulse laser deposition, PLD) и осаждением импульсным дуговым разрядом (Laser arc PVD). Перед нанесением алмазоподобного покрытия для лучшей адгезии у образцов с толщиной покрытия 300 и 500 нм создавали титановый подслои толщиной 800 нм. У образца с толщиной алмазоподобного покрытия 100 нм подслоя отсутствует, также как и у образца с покрытием TiN. При осаждении TiN до толщины 2,5–3 мкм в камеру постепенно добавлялся азот до 200 см³/мин с шагом 1 см³/с.

Морфологию поверхности, шероховатость и количественное определение удельной поверхностной энергии алмазоподобных покрытий проводили на атомно-силовом микроскопе Dimension FastScan компании Bruker с использованием стандартных кремниевых кантилеверов типа NSC-11 (производство MicroMash, Эстония) с радиусом закругления острия 10 нм, с жесткостью консоли 4,8 Н/м в режиме PeakForce QNM (Quantitative Nanoscale Mechanical Mapping). Для данных твердых покрытий режим QNM при использовании кремниевого зонда позволяет оценить распределение адгезионных сил по поверхности и, таким образом, лучше выявить различные фазы и границы зерен.

Удельная поверхностная энергия (работа адгезии) определялась согласно теории Джонсона-Кендалла-Робертса для упругих адгезионных контактов по формуле:

$$\gamma = 2F_{ад}/3(2\pi R), \quad (1)$$

где $F_{ад}$ – сила адгезионного взаимодействия между наконечником зонда и поверхностью, Н; R – радиус наконечника зонда, м [2].

Параметры шероховатости поверхности описывают отклонения реальных поверхностей от номинально гладких. Реальная поверхность состоит из чередующихся ориентированных или беспорядочно расположенных выступов или впадин. Атомно-силовая микроскопия является одним из основных методов измерения шероховатости тонких гладких покрытий.

Обычно считается, что наиболее предпочтительным параметром, характеризующим шероховатость, является среднее арифметическое отклонение профиля R_a , широкое использование которого объясняется тем, что он дает достаточную информацию не только о высоте, но и о профиле неровностей. При неразрушающем контроле покрытия, острие зонда устанавливается на его поверхность и контактирует только с наибольшими выступами шероховатости, вследствие чего целесообразнее оценивать шероховатость по значению наибольшей неровности профиля R_z .

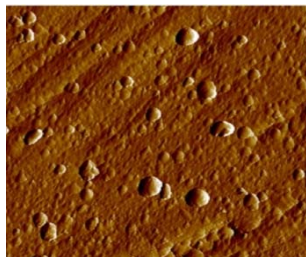
Значения шероховатости, силы адгезии и удельной поверхностной энергии определялись на полях сканирования различного размера от 1×1 до 50×50 мкм..

На рисунке 1 представлена топография алмазоподобных покрытий толщиной 100 и 500 нм на поле 5×5 мкм². Поверхность алмазоподобных покрытий имеет равномерно распределенные частицы диаметром 200 нм с плотностью 25 частиц/мкм² и более крупные частицы диаметром 600 нм с плотностью 1 частица/мкм², что хорошо согласуется с данными работы [3].

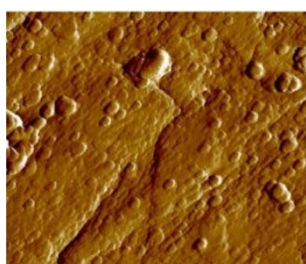
Микроструктура поверхности образца TiN на поле 5×5 мкм имеет рассеянные по поверхности частицы вытянутой формы и небольшие скопления микрочастиц. На поле 20×20 мкм покрытие TiN не имеет малых округлых частиц на поверхности в отличие от алмазоподобных покрытий. На всех покрытиях в режиме адгезии частицы имеют меньшее значение силы адгезии по сравнению с основной частью покрытия.

По результатам определения $F_{ад}$, R_z , γ установлено, что на малых полях до 3×3 мкм все по-

казатели, с увеличением толщины алмазоподобного покрытия, снижаются. При увеличении площади исследования от 5×5 мкм до 50×50 мкм наивысшие показатели имеет алмазоподобное покрытие с толщиной 300 нм, а покрытия с толщиной 100 и 500 нм по значениям практически совпадают.



а



б

Рисунок 1 – АСМ-изображения (5×5 мкм²) поверхности алмазоподобных покрытий различной толщины:
а – 100 нм, б – 500 нм

Покрытие TiN имеет минимальные значения $F_{ад}$, Rz и γ на самом малом исследуемом поле 1×1 мкм, несущественно изменяющиеся значения на полях от 2×2 мкм до 10×10 мкм и увеличение показателей на полях от 20×20 мкм до 50×50 мкм. Однако, в отличие от алмазоподобных покрытий, шероховатость Rz образца TiN на всех исследуемых полях имеет значительно меньшие значения по сравнению с алмазоподобными покрытиями.

Таким образом работа адгезии γ , необходимая для разрыва контакта, на разных полях исследуемых поверхностей, составила: для образца TiN и DLC 300 нм от 0,6 до 1,3 Н/м; для образца DLC 100 нм от 0,3 до 1,3 Н/м; для образца DLC 500 нм от 0,3 до 0,8 Н/м.

Таблица 1 – Значения силы адгезии, удельной поверхностной энергии и шероховатости алмазоподобных пленок и TiN

5×5 мкм	$F_{ад}$, нН	Ra , нм	Rq , нм	Rz , нм	γ , Н/м
TiN	82	4,9	8,4	9,4	0,9
DLC 100 нм	69	15,7	21,7	21,2	0,7
DLC 300 нм	79	14,1	23,9	29,7	0,8
DLC 500 нм	58	14,5	19,6	20,0	0,6

Заключение.

Исследована морфология поверхности алмазоподобных покрытий. Проведено количественное исследование сил адгезии $F_{ад}$ и удельной поверхностной энергии γ на поверхности TiN покрытия и алмазоподобных покрытий (DLC) толщиной 100, 300 и 500 нм методом атомно-силовой микроскопии на полях сканирования от 1×1 до 50×50 мкм. Наименьшая удельная поверхностная энергия γ у покрытия DLC толщиной 500 нм. На малых полях до 3×3 мкм $F_{ад}$ и γ с увеличением толщины алмазоподобного покрытия снижаются. При увеличении площади исследования до 50×50 мкм максимальные значения $F_{ад}$ и γ имеет алмазоподобное покрытие с толщиной 300 нм, а покрытия с толщиной 100 и 500 нм по значениям практически совпадают.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Ф20Р-217)

Литература

1. S. Chizhik, Micro and Nanoscale Wear Studies of HDD Slide Bearings By Atomic Force Microscopy / S. Chizhik, A. Khudoley, T. Kuznetsova, K. Wierzcholski, A. Miszczak // 2010, Proceedings of Methodological Aspects of Scanning Probe Microscopy, Heat and Mass Transfer Institute of NAS, pp. 247–252.
2. Т.А. Кузнецова, Микронзонды для определения силы адгезии и удельной поверхностной энергии методом атомно-силовой микроскопии / Т.А. Кузнецова, Н.В. Чижик, Т.И. Ширяева // 2013, Приборы и методы измерений, 2013. № 1 (6). – С. 41–45.
3. Углов В.В., Взаимосвязь микроструктурного состояния поверхности и механических свойств углеродных и металл-углеродных покрытий, формируемых плазмо-усиленным химическим вакуумным осаждением / Углов В.В и др. // Перспективные материалы, 2003. – № 6. – С. 5–11.

УДК 621.179.14; 621.317.44

МОДИФИКАЦИЯ МЕРЫ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ФЕРРОЗОНДОВЫХ ГРАДИЕНТОМЕТРОВ С НЕСООСНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ПОЛУЗОНДОВ

Кулагин В.Н., Осипов А.А., Пиунов В.Д.

Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Для аппаратуры магнитной технической диагностики и неразрушающего контроля, как и для ряда средств измерений параметров магнитного поля, в качестве метрологического обеспечения часто используются меры параметров магнитного поля, содержащие катушки с электрическим током. Такие меры имеют некоторую рабочую область высокой однородности нужного магнитного параметра, требуемую для поверки или калибровки соответствующей аппаратуры.

Ранее была описана мера для калибровки используемых в структуроскопии феррозондовых градиентометров с несоосным (поперечным) расположением полузондов [1]. С целью создания области однородного градиента магнитного поля для таких градиентометров была предложена конструкция (рисунок 1), содержащая 2 пары градиентометрических катушек (колец) с током (градиентная пара [2] Максвелла).

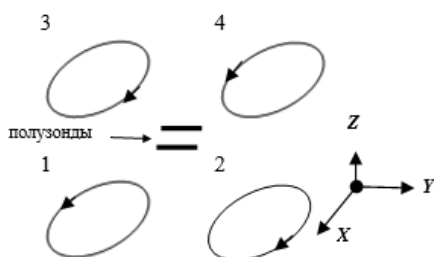


Рисунок 1 – Расположение токовых колец (катушек) для преобразователей с поперечным расположением полузондов

При этом пара колец 3 и 4 лежит в плоскости, расположенной на расстоянии $\Delta Z_{13} = \Delta Z_{24}$ от параллельной ей плоскости, в которой лежит другая пара колец 1 и 2 (рисунок 1). Эта мера, в сравнении с серийно выпускаемой [3] мерой градиента напряженности постоянного магнитного поля М-101, обладающей «односторонним» (по одной координате) доступом в рабочую область (куб с размерами сторон 10 мм при относительной неоднородности градиента в ней 1,5 %), имеет «трёхсторонний» доступ в свою рабочую область. При этом неоднородность градиента по всем трём взаимноперпендикулярным осям менее 0,5 % в объёме куба с размерами сторон 40 мм. Но, даже «трёхсторонний» доступ в рабочую область меры, если она находится внутри системы токовых катушек, ограничивает её использование, если малогабаритный градиентометр оказывается встроенным в систему преобразователя, содержащего, например, намагничи-

вающие катушки, превосходящие размер рабочей области меры. Такие преобразователи с наличием градиентометров, выполненных из двух полузондов (рисунок 1), используются в дефектоскопии при измерении магнитной анизотропии ферромагнитных изделий [4, 5] и в ряде других случаев. Для их калибровки и поверки не подходят вышеуказанные меры [1, 3].

Ниже описана модифицированная мера градиента магнитного поля с областью однородности градиента магнитного поля, находящейся снаружи системы токовых катушек, не имеющая ограничений при расположении преобразователя в плоскости перпендикулярной осям этих токовых катушек на некотором расстоянии от них.

Для создания реально работающей конструкции такой меры на основе закона Био-Савара-Лапласа был проведен расчёт градиента магнитного поля G системы токовых колец, показанных на рисунке 1 с одной парой колец (1 и 2) без наличия колец 3 и 4. Определялась такая их конфигурация, чтобы составляющая градиента напряжённости магнитного поля dH_x/dz или dH_y/dz в области указанного на рисунке 1 расположения полузондов градиентометра преобразователя имела бы минимальную неоднородность.

Предполагалось, что оси X и Y расположены в горизонтальной плоскости, ось Z направлена по высоте меры. Форма катушек использовалась прямоугольная, толщина намотки по всем размерам была выбрана одинаковой и равной 10 мм, то есть рассмотрен вариант относительно тонких катушек. Рассматривалась возможность создания однородного градиента по координатам в зоне 30–40 мм, необходимой при длине полузондов ($L_1 = L_2 = 15$ мм) и поперечного расстояния (ΔZ) между ними в 15 мм.

При проведении численного расчета по каждой из трех проекций магнитной индукции в качестве исходных использовались выражения вида (в СИ)

$$dB_x = \mu_0 I \cdot (dl_y r_z - dl_z r_y) / (4\pi r^3), \quad (1)$$

$$dB_y = \mu_0 I \cdot (dl_z r_x - dl_x r_z) / (4\pi r^3), \quad (2)$$

$$dB_z = \mu_0 I \cdot (dl_x r_y - dl_y r_x) / (4\pi r^3), \quad (3)$$

где I – величина тока в проводнике, dl – элемент проводника, r – радиус-вектор, проведенный от элемента проводника в рассматриваемую точку поля.

Оказалось, что и для двух таких катушек (колец) возможно нахождение лежащей на некото-

ром расстоянии от катушек по оси Z области с однородностью, достаточной для требуемой точности метрологического обеспечения калибровочных и поверочных работ. На рисунке 2 показаны характеристики градиента напряжённости магнитного поля рабочей области одного из численно рассчитанных и реализованных вариантов модифицированной меры.

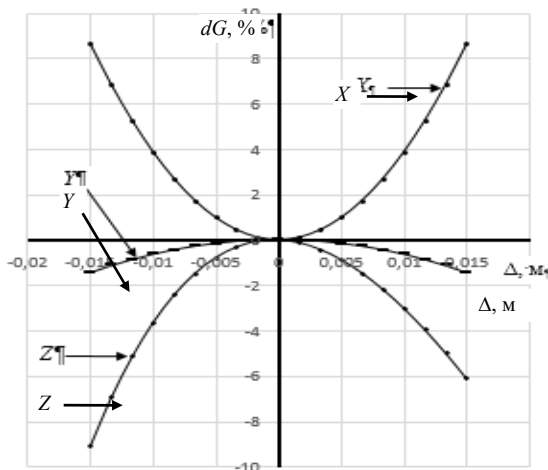


Рисунок 2 – Изменение величины градиента магнитного поля при смещении точки измерения Δ от центра рабочего объема меры по координатам X , Y и Z

Из рисунка 2 видно, что по координате Y на расстоянии ± 5 мм неоднородность градиента не превышает долей процента, а по координатам X и Z – около 1%. В рассмотренном конкретном случае получены сравнительно неплохие показатели однородности, не хуже, чем для серийной меры М-101.

Для практического использования важно, чтобы, по крайней мере, по одной из координат изменение (неоднородность) величины градиента магнитного поля в рабочей области меры была минимальной, но это справедливо при соосном расположении полузондов. Учитывая довольно большое расстояние (от нескольких миллиметров до десяти и более) между полузондами (рисунок 1), важно, чтобы хотя бы по двум координатам (например, Y и X) неоднородность вдоль них также была достаточно мала.

Обычно, требования к неоднородности по третьей координате заметно ниже и зависят от диаметра используемых полузондов. Следует также обратить внимание, что неоднородности по координатам Z и X хотя и близки, но имеют различия, которые следует учитывать. Так неоднородность по координате X симметрична, как и величина создаваемого мерой магнитного поля, относительно центра системы координат (рисунки 1 и 2).

Неоднородность магнитного поля по абсолютной величине по координате Z заметно больше слева, чем справа. Это связано с тем, что поле по координате X создается симметрично расположенными по X градиентными катушками 1 и 2 (рисунок 1). То же самое можно сказать и в отношении координаты Y .

В направлении же координаты Z , поскольку верхние катушки 3 и 4, приведенные на рисунке 1, не используются в данном случае, то и неоднородность несимметрична относительно центра координат.

Вычисления были проведены для нескольких вариантов размеров разрабатываемой меры. Вариант, представленный на рисунке 2, обеспечивает создание меры с максимальными внешними размерами, не превышающими 200 мм.

Подобная модифицированная мера может быть полезна для метрологического обеспечения аппаратуры, которая используется в магнитной технической диагностике и неразрушающем контроле, где малогабаритный градиентометр является составным элементом крупногабаритного преобразователя, например, в магнитной структуроскопии при использовании приборов импульсно-локального типа.

Применённая модель и расчётный механизм громоздки и не позволяют получить однозначного аналитического решения, но, с использованием современной вычислительной техники, дают возможность находить приемлемые варианты как градиентометрических, так и полевых мер для конкретных конструкций преобразователей, особенно для крупноразмерных.

Литература

1. Кулагин, В.Н. Мера для калибровки феррозондовых градиентометров с несоосным (поперечным) расположением полузондов / В.Н. Кулагин, А.А. Осипов, В.Д. Пиунов // Доклады 12-й международной научно-технической конференции «Приборостроение 2019», – Минск: БНТУ – С. 148–150.
2. Афанасьев, Ю.В. Средства измерений параметров магнитного поля. / Ю.В. Афанасьев, Н.В. Студенцов, В.Н. Хорев – Л.: Энергия, 1979. – 320 с.
3. Мера градиента напряжённости постоянного магнитного поля М-101. Государственный реестр средств измерений Российской Федерации, 2010, № 44867–10.
4. Счастный, А.С. Исследование возможности контроля анизотропии листового проката / А.С. Счастный, А.А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2014. – № 3. – С. 20–33.
5. Счастный, А.С. Механическая анизотропия и параметры петли магнитного гистерезиса листового проката низкоуглеродистых сталей / А.С. Счастный, А.А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2015. – № 3. – С. 15–27.

УДК 535.3

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ РЕЕСТРА РИСКОВ АККРЕДИТОВАННОЙ ЛАБОРАТОРИИ В КОНТЕКСТЕ ТРЕБОВАНИЙ СТАНДАРТА ГОСТ ISO/IEC 17025-2019

Савкова Е.Н., Шевчук В.А., Сипачев И.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Согласно требованиям стандарта ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 лаборатория должна планировать и осуществлять действия по управлению рисками и возможностями: идентификацию рисков «для своей беспристрастности на постоянной основе» (п. 4.1.4); в рамках системы менеджмента качества (далее – СМК) «действия, связанные с рисками и возможностями» (п. 8.1.5); «рассмотрение рисков и возможностей, связанных с лабораторной деятельностью» (п. 8.5.1); идентификацию и выбор возможностей для улучшений (п. 8.6.1) и др. В этой связи эффективным внутренним документом СМК аккредитованной лаборатории является паспорт (или реестр) рисков. Анализ реестров рисков отечественных и зарубежных лабораторий показал существенные различия в них и отсутствие комплексного подхода к их разработке. В то же время обширная нормативная база и накопленный опыт позволяют использовать действующие документы и разработать методические рекомендации для аккредитованных лабораторий.

Концепция построения реестра рисков

строится на схеме метода оценки риска опасных событий согласно ГОСТ Р 51901.23-2012, включающей восемь основных этапов:

1. Идентификация опасных событий.
2. Классификация возможных последствий и ущерба.
3. Определение краткого наименования опасного события и его описание.
4. Установление этапа жизненного цикла продукции (услуги), на котором может возникнуть опасное событие.
5. Анализ риска.
6. Сравнительная оценка риска.
7. Мониторинг риска и пересмотр реестра риска.
8. Разработка, утверждение, ведение и актуализация реестра риска.

При этом в основу идентификации опасных событий авторами положена модель контекста организации в соответствии с СТБ ISO 9001-2015, рассматривающая организацию как открытую систему, характеризуемую набором внутренних переменных, взаимодействующую с факторами внешней среды (переменными) «дальнего» и «ближнего» окружения. Данные переменные, являющиеся потенциальными опасностями и одновременно потенциальными возможностями достижения устойчивого успеха, возникающими в деятельности любой орга-

низации, авторы предлагают разделить на три категории:

1. Внутренние переменные, представленные факторами внутренней среды (контролируемыми организацией) – например, профессиональные, информационные;

2. Внешние переменные, характеризующие «ближнее» окружение – заинтересованные стороны в деятельности организации (поставщики, партнеры, посредники, заказчики, контролируемые и надзорные органы, банки и т.д.), частично контролируемые организацией, например, экономические;

3. Внешние переменные (неконтролируемые организацией) – «дальнее» окружение – например, природные, биолого-социальные, техногенные факторы и т.д.

Применяя пессимистический подход и рассматривая данные переменные как опасности, выделим основные объекты их воздействия согласно рекомендациям ГОСТ Р 51901.22-2012: «Люди», «Окружающая среда», «Экономика», «Управление», «Социальная среда», «Инфраструктура», что иллюстрируется схемой в виде «галстук-бабочка», приведенной на рисунке 1.



Рисунок 1 – Основные опасности и объекты их воздействия

На рисунке в левой колонке приведены классы опасностей.

Определение краткого наименования опасного события и его описание удобно осуществлять в соответствии с рекомендациями ГОСТ Р 51901.22-2012 путем составления кодификационной таблицы классов опасностей с их описанием и обозначениями. Например, для

класса «Профессиональные опасности» (код «ПР»), которые определены организацией в соответствии с законодательными и обязательными требованиями, предложена система буквенных кодов, показанная в таблице 1.

Таблица 1 – Идентификация опасностей

Вид опасности	Код
беспристрастность	ПРБ
профессиональная честность	ПРЧ
ответственность	ПРО
добросовестность	ПРД
знания операционных процедур	ПРП
знания техники безопасности	ПРТБ
опыт	ПРО
мотивация	ПРМ
внимательность	ПРВ

При установлении этапа жизненного цикла продукции (услуги), на котором может возникнуть опасное событие, деятельность аккредитованной лаборатории предложено условно разделить на два направления.

Первое направление – «Деятельность, связанная с аккредитацией», в процессе которой согласно [1] можно выделить этапы:

- 1.1) представление на экспертизу в орган по аккредитации документов;
- 1.2) заключение договора;
- 1.3) оценка представителями органа по аккредитации на месте;
- 1.4) обобщение органом по аккредитации полученных данных и подготовку отчетов по оценке и принятие решения по аккредитации;
- 1.5) выдача, внесение изменений и (или) дополнений, приостановление действия, возобновление действия, отмену действия аттестата аккредитации;
- 1.6) периодическая оценка компетентности с оценкой на месте и мониторинг;
- 1.7) ссылка на аккредитацию и применение знака аккредитации.

Второе направление – «Лабораторная деятельность» по мнению авторов удобно рассматривать в контексте ГОСТ ISO/IEC 17025-2019, выделив этапы:

- 2.1) рассмотрение запросов, тендеров и договоров;
- 2.2) выбор, верификация и валидация методов;
- 2.3) отбор образцов;
- 2.4) обращение с объектами испытаний или калибровки;
- 2.5) технические записи;

- 2.6) оценивание неопределённости измерений;
- 2.7) Обеспечение достоверности результатов;
- 2.8) Представление отчетов о результатах;
- 2.9) Рассмотрение жалоб (претензий);
- 2.10) Управление несоответствующей работой и т.д.

Анализ риска осуществлялся на основе предварительно составленной классификации/кодировки возможных последствий и ущерба, фрагмент которой представлен в виде таблицы 2.

Таблица 2

№	Вид последствий	Код
1	Материальные затраты	001
2	Экономические потери	002
3	Трудозатраты	003
4	Затраты времени	004

Анализ показал, что некоторые опасные события первого направления деятельности лаборатории могут стать последствиями ее второго направления. Оценку последствий (ущерба) при реализации опасного события (в днях простоя, в стоимостном выражении или в других единицах измерения) лаборатория может оценить в каждом конкретном случае. Вероятность (собственно) возникновения опасного события авторы предлагают осуществлять путем использования автоматизированной экспертной системы, представляющей собой базу знаний лаборатории.

Сравнительная оценка риска может осуществляться основе метода попарных сравнений с последующим ранжированием рисков, используя рекомендации ГОСТР 51901.23-2012 в виде матриц «Оценка вероятности опасного события в течение года», «Качественная оценка риска», «Оценка риска для высокой неопределенности данных», «Оценка риска для низкой неопределенности данных» и др.

Таким образом, процесс управления рисками в деятельности аккредитованной лаборатории может быть описан в виде документа – реестра/паспорта рисков, который, по сути, представляет собой динамичную систему взаимодействующих переменных, которой можно управлять посредством автоматизированной экспертной системы, увязывающей комбинации внутренних и внешних факторов рисков. Предложенный авторами комплексный подход может быть адаптирован к деятельности любой аккредитованной лаборатории.

Литература

1. Правила аккредитации, утвержденные Постановлением Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь. – 31.05.2011, № 27.

UDC 331.556.4

STUDENT-TO-WORKER TRANSITION AS A FACTOR OF CHINESE LABOR IMMIGRATION TO EUROPEAN COUNTRIES

Savkov N.

*Shandong University of Finance and Economics
Jinan, China*

In the globalized world, international migration becomes more common and diversified. In modern migration-related studies, researchers analyze the impact of international migration on bilateral trade between the countries. The impact on bilateral trade can be explained by three possible factors. Firstly, migrant networks alleviate incomplete information. They can help to overcome informal trade barriers related to language, culture, and institutions. Ethnic networks often share valuable market information and thus help in identifying business opportunities and creating business partnerships. Secondly, migrant networks reduce frictions related to asymmetric information. For instance, co-ethnicity can raise contract enforcement since members of the same ethnic network are less likely to cheat each other. These two mechanisms constitute the trade cost channel. Thirdly, via the preference channel, migrants boost imports to the host country if they derive higher utility from the consumption of goods made in the country of their ethnic origin [1]. However, the preference factor in imports is more important for first-generation immigrants, because the second-generation better adjust themselves to the host country's local cuisine and habits.

With an estimated size of approximately 65 million, the overseas Chinese are considered to be one of the largest diasporas in the world. Those from the Chinese diaspora can be expected to have a better idea of the Chinese bureaucracy apparatus, contract law enforcement issues, or even the importance of government relations, and being able to trust key partners in China may prove to be very valuable, as uncertainty is reduced. Some studies show that the growth of Chinese diaspora in one's country has a positive effect on its bilateral trade with China. For export sectors, effects found were strongest for food, as well as for machinery and transport equipment. In regards to imports, largest effects were found for raw materials, machinery and transport equipment, and chemicals [2]. Nevertheless, overseas Chinese are diversified, and there are different groups based on different places of origin, spoken dialects, social status, etc. For example, in Italy and France, a significant part of diaspora consists of Wenzhounese Chinese.

Overseas Chinese live all around the world, with the biggest diaspora residing in South-East Asia, North America, and Europe. In Europe, the main destinations of Chinese immigration are Great Britain, France, Germany, Italy, Spain, and the Netherlands. In 1980–1990s, immigration through illegal means was one of the main sources of Chinese immigration to those countries. The illegal immigrants often used

some judicial loopholes, for example, residence amnesty, that helped them obtain the legal status in the country of residence after living there for a few years. This policy was especially common in Italy and Spain. There were cases when Chinese immigrants who resided in other countries like France and the UK obtained legal residence status in Italy, because it was much easier there. A certain amount of immigrants who got into Europe illegally were not educated, many of them haven't studied in high school, so they didn't have an advantage in terms of human capital accumulation. Thus, it was difficult for them to integrate into the residing country's society [3]. Because of the rapid economic growth in China, the overall quality of life in the country has grown significantly. At the moment, illegal immigration from China to Europe has significantly decreased. Overseas Chinese in Europe often keep their Chinese citizenship, because in China the dual citizenship is not allowed. But with the long-term residence status, they can move inside EU borders without any problems while being able to return or travel to China anytime.

While entrepreneurship has long characterized Chinese migration to Europe (and elsewhere in the world), highly skilled professionals and graduates are now diversifying ethnic Chinese communities all over Europe. Compared with previous Chinese migration communities, which were dominated by low-skilled Chinese labor from Zhejiang and Fujian, Chinese students and professionals are relatively heterogeneous in terms of provenance, social class, cultural identities, political loyalties, and the way they increasingly interact with local mainstream societies. The changing compositions of Chinese migrants are transforming urban city landscapes, labor markets and ethnic Chinese communities in Europe in terms of burgeoning political activism for citizenship rights and protection against violence, xenophobia, and racism. This brings new political and economic implications for the relationships between China and European nation-states [4]. One distinctive immigration scheme in this context has been the vending of citizenship and residence permits in return for financial investments embraced by more than 20 European countries. During the last decade, these schemes have particularly attracted Chinese real estate investors and their families to European countries such as Portugal and Greece.

Nowadays, the main way for Chinese to get into European countries for the long-term is by obtaining student, working, family or investor visa. By 2016, Italy had the largest stocks of Chinese workers;

Spain, France, and the Netherlands had the largest stocks of Chinese admitted on family visas; and the UK and Germany had the largest stocks of Chinese students. Only Italy hosted more Chinese admitted for employment than for education or family reunification. Spain, France, and the Netherlands hosted the largest numbers of Chinese admitted on family reunification grounds, while the UK and Germany as students. Different profiles of Chinese residents have different labor market integration needs. In the case of students, they are usually young, highly skilled, and usually more integrated into the host country's society. On the job market, they are not thought to compete with natives for the same jobs, because their wage expectations are often lower than natives' [5]. In the academic sphere, foreign PhDs are more likely to stay in the research labs than to choose work in the private sector.

With the rise of quality of life in China, many parents choose to send their children to study abroad. While the main destination is still the US, more Chinese student migration could be expected in Europe soon. Chinese students can provide a locally available supply of well-integrated, highly skilled workers. The UK, France, Germany, and the Netherlands developed attractive programs for international students. By doing this, the countries can raise the quality bar for the labor migration. That can assure that new workers will be educated, high skilled, used to live in the country, speak the language. The recognition of EU diplomas and the freedom of labor mobility may attract Chinese students to non-traditional countries of student migration with the assumption that having secured the first job, for example in Italy, they would eventually be able to secure one in Germany. The EU Blue Card has made such a process possible. Among the six destination countries, Germany has received the largest proportion of Chinese EU Blue Card applicants [5]. During the last few years, there was an increase in Chinese students studying in Scandinavia and Eastern Europe.

Chinese students decide whether they want to stay in Europe or move back to China, but a certain amount of them would prefer to stay. Certain factors affect the student-to-worker transition. Firstly, the country's legislature towards the issuance of working visas. Secondly, the length of the post-graduation adjustment period. For example, in 2018 Germany offered the longest (18 months long) transition period during which non-EU graduates of

German universities could remain in the country to look for a job. Spain, on the other hand, required foreign alumni of Spanish universities to find a job immediately upon graduation. Thirdly, the language barrier. While Chinese students tend to choose English-taught programs in the universities, the employers usually favor those who could fluently speak the local language, for example, French in France. Fourthly, the cultural networks. Existing cultural and social ties between countries make it easier for students to find a job. In the case of the UK, those from the Commonwealth are easier to get a working visa, and its easier for Latin Americans to stay on working visa in Spain. For Chinese, one of the strongest ethnic networks is in Italy because of historical reasons.

The student-to-worker transition can be one of the desirable sources of immigrants for European countries because former students are usually well integrated with the host countries' labour markets and society, can speak the local language and have a decent educational background. In addition to this, international students bring funds to fee-charging educational institutions, for example, the private ones. Countries without the benefit of a widely spoken language or history of international student migration, such as Germany or the Netherlands, have begun to recruit in China, created English language programs, and facilitated diploma recognition. To provide better chances of successful student-to-worker transition, the governments need to adjust the working visa legislature, set reasonable post-graduation adjustment periods, and provide necessary language programs.

References

1. Priebe, J. Does the Chinese diaspora speed up growth in host countries. / J. Priebe, R. Rudolf // *World Development*. – 2015. – Vol. 76. – P. 249–262.
2. Martinez-Sarzoso, I. The trade facilitation impact of Chinese diaspora. / I. Martinez-Sarzoso, R. Rudolf // *The World Economy*. – World Trade Organization. – 2020. – Vol. 43, no. 9. – P. 2411–2436.
3. Marsden, A. Chinese descendants in Italy: emergence, role and uncertain identity. / *Ethnic and Racial Studies*. - 2014. - Vol. 37, no. 7. – P. 1239–1252.
4. Thunø, M. Introduction: New dynamics of Chinese migration to Europe. / M. Thunø, M. Li // *International Migration*. - 2020. Vol. 58, no. 3.
5. Plewa, P. Chinese labor migration to Europe, 2008-16. Implications for China-EU mobility in the post-crisis context. / *International Migration*. – 2020. Vol. 58, no. 3., pp. 22–42.

УДК 621.3.011.7.08

**МЕТОДИКА БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ ПОСТОЯННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЦЕПЯХ**

Сычик В.А., Уласюк Н.Н., Глухманчук В.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Измерение высоких напряжений постоянного тока производится с помощью высоковольтных электростатических вольтметров, коронирующих высоковольтных измерительных устройств, приборов на базе оптоэлектроники, а также с помощью низковольтных измерительных приборов, подключаемых к измерительному объекту через активный делитель напряжений. Однако методика контроля высоких напряжений, использующая оптоэлектронные измерительные устройства, обладает невысокой точностью, а другие упомянутые методы контроля предусматривают непосредственный контакт измерительных приборов с высоковольтными цепями, что резко снижает условия техники безопасности.

Эффективным методом бесконтактного измерения высоких напряжений постоянного тока является электрический метод, базирующийся на измерении электростатических полей и их градиентов от заряженных металлических элементов.

Разработана методика бесконтактного измерения высоких напряжений, базирующаяся на основных положениях электрического метода [1].

Базовая методика точного измерения высоких напряжений постоянного тока путем оценки электростатических полей основана на периодическом экспонировании и экранировании помещенного в электростатическое поле измерительного электрода и измерении колебательного напряжения в нагрузке – затворе МДП-транзистора с индуцированным каналом. В случае, если время экспонирования $t_{es} = \tau_1$, а время экранирования $t_{ek} = \tau_2$, где τ_1 – постоянная времени индуцирования на измерительном электроде максимального заряда Q_m ; τ_2 – время стекания Q_m через входное сопротивление МДП-триодной структуры, выходное напряжение, выделяемое в истоковой цепи МДП-триодной структуры, максимально и составляет

$$U_{\text{вых}} = K_1 S R_H E_x,$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий площадь электрода S , и свойства окружающей среды:

$$K_1 = \epsilon_a S_s / C;$$

C – суммарная емкость системы измерительный электрод–МДП-структура.

Поскольку контролируемая напряженность

$$E_x = Q / 4\pi\epsilon_a r^2,$$

то для снижения систематической погрешности необходимо обеспечить $r \equiv \text{const}$ и стабилизиро-

вать ϵ_a . Нейтрализация этих условий заложена в конструкции преобразователя электрических полей.

Второй метод контроля высоких напряжений постоянного тока разработан применительно к измерению высокого напряжения на анодах кинескопов [2] и реализуется по представленной на рисунке 1 структурной схеме.

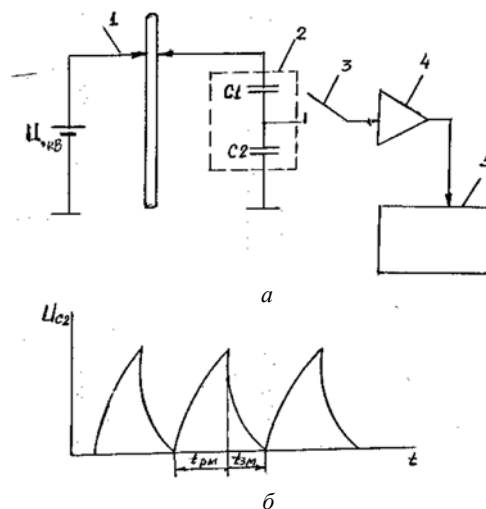


Рисунок 1 – Структурная схема метода бесконтактного контроля высоких напряжений постоянного тока (а) и форма напряжения на выходе электронного усилителя (б)

Напряжение U анода кинескопа воздействует на емкостной делитель, содержащий высоковольтный C_1 и низковольтный C_2 конденсаторы. При этом последовательно соединенные конденсаторы делителя выбираются, исходя из следующей зависимости

$$q = C_1 U_1 = C_2 U_2 \tag{1}$$

откуда $U_1/U_2 = C_2/C_1$.

При известном диапазоне измеряемых высоких напряжений, а также выбранном высоковольтном конденсаторе C_1 , выдерживающем верхнее предельное напряжение, конденсатор C_2 определяется с учетом чувствительности и динамического диапазона по входному сигналу электронного усилителя $U_{\text{вх. max}} - U_{\text{вх. min}}$ б з следующей зависимости:

$$C_2 = C_1 U_1 / U_2 \tag{2}$$

Принимая $U_1 = U_x$, кВ – высокое напряжение, а $U_2 = U_{\text{вх}}$, В – низкое напряжение, емкость C_2 находится из соотношения

$$C_2 = C_1 U_{\text{хmax}} / U_{\text{вхmax}} \quad (3)$$

Осуществляя периодическую коммутацию электронного коммутатора при замыкании его контактной группы в течение времени

$$t_{\text{зм}} = \tau_2$$

и размыкании контактной группы в течение времени

$$t_{\text{рм}} = \tau_1,$$

во входной цепи усилителя формируют пульсирующее напряжение сигнала (рис.1б)

$$U_{\text{вх}} = K_1 U_x. \quad (4)$$

Здесь K_1 – коэффициент пропорциональности, учитывающий соотношение C_1/C_2 , τ_1/τ_2 ; τ_1 – постоянная времени емкостного делителя; τ_2 – постоянная времени входной цепи усилителя. Усиленный с помощью электронного усилителя сигнал подается на измерительный блок (цифровой блок с цифровым индикаторным табло), который в соответствии с формулой

$$U_{\text{вых}} = K_2 U_x \quad (5)$$

отображает истинное значение контролируемого высокого напряжения U_x . В (5) K_2 – коэффициент пропорциональности, который дополнительно учитывает K_u усилителя и коэффициент

преобразования сигнала измерительным устройством.

Для диапазона напряжений 23–30 кВ емкости $C_1 = 470$ пФ, $C_2 = 170 \cdot 10^4$ пФ. Величины $\tau_1 = 10^{-3}$ – 10^{-4} с, $\tau_2 = 18 \cdot 10^{-3}$ с, поэтому в качестве электронного коммутатора может быть использовано устройство на тристабильных элементах.

Суммарная погрешность измерения высоких напряжений не превышает $\pm 5\%$.

Выводы. Синтезирована эффективная и безопасная методика бесконтактного измерения высоких напряжений постоянного тока, включающая операции точной оценки излучаемой высоковольтной поверхностью напряженности электрического поля путем использования экранирующего, измерительного электродов и их периодического экспонирования и экранирования.

Для измерения постоянного напряжения в высоковольтных цепях кинескопов создан метод, использующий структуру емкостной делитель–электронный коммутатор–измерительных блок.

Литература

1. Сычик В.А., Уласюк Н.Н. и др. Бесконтактный измеритель высоких напряжений/ Тезисы докладов НТК ВУЗов прибалтийских республик. – Мн., 1989. – С. 52.
2. Патент России 2080606, G01 R19/00, 1997. Способ измерения высокого напряжения постоянного тока / Сычик В.А., Уласюк Н.Н.

Секция 3. ФИЗИЧЕСКИЕ, ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ, МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 530.182

РЕШЕНИЕ ТИПА КИНКА МОДИФИЦИРОВАННОГО УРАВНЕНИЯ ФИШЕРА-КОЛОМОГОВОРА-ПЕТРОВСКОГО-ПISКУНОВА

Блинкова Н.Г., Князев М.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Нелинейные уравнения в частных производных привлекают все более возрастающее внимание специалистов различных областей науки и техники. Это обусловлено тем, что линейные уравнения и нелинейные уравнения с малыми возмущениями практически полностью изучены и поведение их решений хорошо известно. Особый интерес представляют так называемые существенно нелинейные уравнения. Особенностью таких уравнений является непертурбативный характер нелинейных членов, что исключает возможность применения теории возмущений для их решения. Такие уравнения допускают решения типа солитонов или солитоподобных объектов (кинков) и их связанных состояний.

В настоящей работе рассмотрено модифицированное уравнение Фишера-Коломогорова-Петровского-Пискунова (ФКПП). Это уравнение в не модифицированной форме имеет вид [1]:

$$u_t - u_{xx} - u + u^2 = 0.$$

Здесь $u_t = \partial u / \partial t$ и аналогично для других членов. Уравнение ФКПП изучено достаточно полно. Оно находит широкое применение в биофизике, задачах экологии и химии, поскольку это типичное уравнение конвекции-реакции-диффузии. Дальнейшее повышение точности описания явлений и процессов при помощи уравнения ФКПП требует учета дополнительных эффектов взаимодействия. Наиболее доступный способ сделать это – учесть дополнительные слагаемые в выражении для потенциальной энергии. В таком случае получим модифицированное уравнение ФКПП

$$u_t - u_{xx} - u + u^2 + u^3 = 0. \quad (1)$$

Чтобы построить решение уравнения (1) применим прямой метод Хироты [2]. Введем замену зависимой переменной вида

$$u(x, t) = \sigma F_x / F, \quad (2)$$

где $F(x, t)$ – новая функция, а σ – константа, которая будет определена ниже. Если подставить соотношение (2) в уравнение (1), последнее примет вид

$$\frac{F_{xt}}{F} - \frac{F_x F_t}{F^2} - \frac{F_{xxx}}{F} + 3 \frac{F_x F_{xx}}{F^2} - 2 \frac{F_x^3}{F^3} - \sigma \frac{F_x^2}{F^2} + \sigma^2 \frac{F_x^3}{F^3} = 0.$$

Данное уравнение является кубическим относительно функции $F(x, t)$. Известно, что некоторые

уравнения такого типа (т.е. кубические; иногда их называют трилинейными) можно решить при помощи метода Хироты при дополнительных специальных условиях [3]. Однако в рассматриваемом случае эти условия не выполняются.

Чтобы к данному уравнению можно было применить метод Хироты, нужно, чтобы последнее уравнение было квадратичным (билинейным) относительно функции $F(x, t)$. Для этого требуется избавиться от членов, пропорциональных третьей степени F . Это можно сделать, поскольку мы строим частное решение. Потребуем, чтобы выполнялось условие

$$(2 - \sigma^2) F_x^3 / F^3 = 0,$$

откуда сразу следует, что $\sigma = \sqrt{2}$. В результате получим уравнение билинейное (квадратное) относительно функции F . Это уравнение можно записать в виде

$$F_{xt} F - F_x F_t - F_{xxx} F + 3 F_x F_{xx} - F_x F + \sqrt{2} F_x^2 = 0. \quad (3)$$

Теперь представим функцию F в виде формального ряда теории возмущений

$$F = 1 + \varepsilon f_1 + \varepsilon^2 f_2 + \varepsilon^3 f_3 + \dots, \quad (4)$$

здесь $f_i = f_i(x, t)$, $i = 1, 2, 3, \dots$ – новые неизвестные функции, а ε – вообще говоря, не обязательно малый параметр.

Если подставить соотношение (4) в уравнение (3) и приравнять нулю коэффициенты при одинаковых степенях ε , то вместо уравнения (3) получим бесконечную систему линейных уравнений в частных производных, решая которую, можно, в принципе, определить все функции f_i , если они существуют. Только первое уравнение этой системы будет однородным, остальные уравнения – неоднородные.

Так как мы ищем решение, описывающее одиночный кинк, то нам понадобятся первые два уравнения этой системы. Они имеют вид

$$f_{1, xt} - f_{1, xxx} - f_{1, x} = 0, \quad (5)$$

$$f_{2, xt} - f_{2, xxx} - f_{2, x} =$$

$$= f_{1, x} f_{1, t} - 3 f_{1, x} f_{1, xx} - \sqrt{2} f_{1, x}^2. \quad (6)$$

Будем искать функцию f_1 в виде

$$f_1 = \exp(kx - \omega t + \eta^0), \quad (7)$$

где k и ω – параметры решения, которые в линейной теории имеют смысл волнового числа и частоты распространения волны. Параметр η^0 характеризует положение решения в начальный момент времени.

Подставим соотношение (7) в уравнение (5) и правую часть уравнения (6), которую затем приравняем нулю. В результате получим два уравнения вида

$$\omega = -k^2 - 1, \quad (8)$$

$$\omega + 3k^2 + \sqrt{2}k^2 = 0, \quad (9)$$

решая которые можно найти конкретные значения параметров k и ω . Уравнение (8) представляет собой дисперсионное соотношение для рассматриваемой задачи.

Теперь можно записать решение типа одиночного кинка уравнения (1) в явном виде:

$$u(x, t) = \frac{k}{\sqrt{2}} \left[1 + \tanh \left(\frac{kx - \omega t + \eta^0}{2} \right) \right]. \quad (10)$$

Чтобы проверить, что соотношение (10) является решением уравнения (1), подставим его в это уравнение и приравняем нулю коэффициенты при всех степенях функции гиперболического тангенса. В результате получим следующие соотношения:

$$\tanh^0: \omega - k^2 - \sqrt{2}k + 2 = 0,$$

$$\tanh^1: 2k^2 + \sqrt{2}k - 1 = 0,$$

$$\tanh^2: 2k^2 + \sqrt{2}k - 1 = 0,$$

$$\tanh^3: -\frac{k^3}{2\sqrt{2}} + \frac{k^3}{2\sqrt{2}} = 0.$$

УДК 620.17

УСТРОЙСТВО И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ТАБЛЕТОК НА СЖАТИЕ

Киселев М.Г., Богдан П.С., Соболев Д.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Определение механической прочности таблеток проводят на устройствах, одни из которых позволяют определить прочность таблеток на сжатие (раскол), другие – на истирание. Объективную оценку механических свойств таблеток можно получить, после определения их прочности обоими способами. Это объясняется тем, что ряд таблетлируемых препаратов, удовлетворяя требованиям на сжатие, имеют легко истираемые края и по этой причине оказываются недоброкачественными.

На сегодня применяется большое количество устройств (тестеров) для проведения этих испытаний. Однако, как показал проведенный анализ, их использование требует уточнения отдельных положений методик и принципиальных схем проведения испытаний. В частности, при испытаниях на раздавливание таблеток не регламен-

тировано значение скорости приложения сжимающей нагрузки, что влияет на точность определения усилия разрушения таблетки. В тестерах по определению истираемости таблеток используются схемы испытаний, при которых может происходить откалывание (раскалывание) таблеток, что в принципе является недопустимым.

В этой связи представляет значительный как научный, так и практический интерес исследования по оценке влияния скорости приложения сжимающей нагрузки на точность определения усилия разрушения таблетки, а также исследования, направленные на оптимизацию условий проведения испытаний таблеток на истираемость, в чем и заключалась цель данной работы.

Механическую прочность таблеток на сжатие определяют на специальных приборах. Они имеют два расположенных один напротив друго-

Литература

1. Yirui Yang. Solitary wave solutions of FKPP equation using Homogeneous balance method / Yirui Yang, Wei Kou, Xiaopeng Wang and Xurong Chen // <http://xxx.lanl.gov> (arXiv: nlin.PS/2009.11378).
2. Абловиц, М. Солитоны и метод обратной задачи / Москва: Мир, 1987. – 479 с.
3. Hietarinta J. Hirota's bilinear method and its generalization / J. Hietarinta // Intern. J. Modern Physics. – 1997. – V. 12, № 1. – P. 43–51.

го зажимы, один из которых может перемещаться в направлении ко второму. Сдавливающие поверхности зажимов должны быть плоскими и превышать по размеру зону контакта с ребром таблетки. Калибруются такие приборы с точностью до 1 Н.

Испытания проводят на 10 таблетках. Таблетку помещают между зажимами, к ним ребром, учитывая ее форму, разделительную риску и надпись. Во всех случаях таблетка должна быть одинаково ориентирована по отношению к направлению прилагаемой силы. По результатам проведенных испытаний определяют среднее значение измеренной силы в Ньютонах.

При проведении испытания таблетку 2 (рисунок 1) в горизонтальном положении помещают в держатель прибора, который состоит из неподвижной опоры 3 и подвижного пуансона 1.

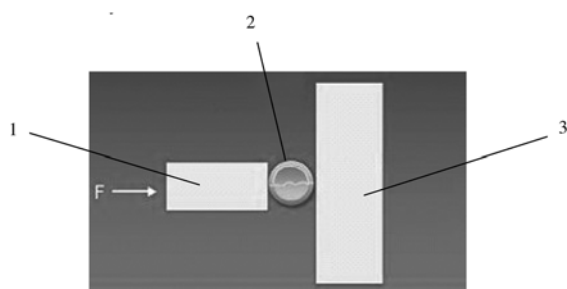


Рисунок 1 – Схема испытания таблеток на сжатие на приборе ТВН 225

При начале испытания подвижный пуансон от привода движется в сторону таблетки и воздействует на нее с усилием F , вызывающим ее разрушения и на дисплее фиксируется значение этого усилия.

В зависимости от диаметра таблетки, она должна иметь стойкость к раздавливанию не ниже следующих значений. При диаметре таблетки 6 мм – 10 Н; 7 мм – 20 Н; 9 и 10 мм – 30 Н; 11 мм – 40 Н; 12 и 13 мм – 50 Н. Показатель прочности таблеток (K) рассчитывают по формуле:

$$K = F/h \cdot d \text{ (МПа),}$$

где F – разрушающая нагрузка, Н; d – диаметр таблетки по центру, мм; h – высота таблетки по центру, мм.

Показатель прочности должен быть 0,45 – 1,2 МПа.

Для проведения экспериментальных исследований использовалась специально созданное устройство по определению прочности таблеток на сжатие, принципиальная схема которого представлена на рисунке 2.

Испытуемая таблетка 8 устанавливается вертикально на плоской поверхности стальной цилиндрической опоры 5, которая закреплена в несущей планке 7. Последняя неподвижно соединена с тензометрическим датчиком усилия 6. Пуансон 4 прикреплен к подвижной каретке 3,

которая от электродвигателя 1 постоянного тока МН250, через муфту 10 и передачу «винт-гайка» 9 получает поступательное движение вдоль вертикальной оси, перемещаясь по направляющим скользящим 2.

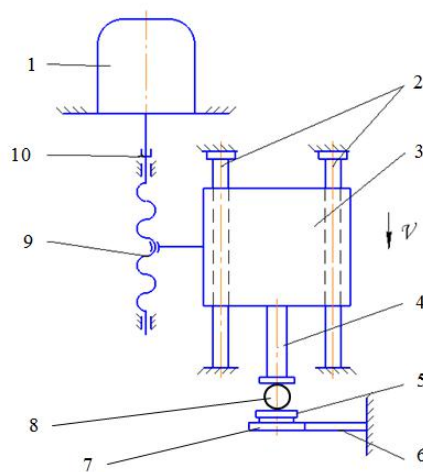


Рисунок 2 – Принципиальная схема устройства определения прочности таблеток на сжатие

Принцип работы устройства заключается в следующем. Предварительно каретка вместе с пуансоном поднимаются вверх на расстояние, обеспечивающее удобные условия для размещения испытуемой таблетки на поверхности стальной опоры. Направление движения каретки изменяется за счет реверсирования направления вращения вала электродвигателя, подключенного к блоку питания постоянного тока. После установки испытуемой таблетки на поверхность опоры и ее соответствующей ориентации на ней, включается электродвигатель, обеспечивающий перемещение пуансона вниз со скоростью V . При достижении пуансоном поверхности испытуемой таблетки начинается процесс ее раздавливания. Действующее при этом усилие сжатия $P_{сж}$ вызывает упругую деформацию тензометрического датчика, сигнал с которого поступает на усилитель и далее на цифровой запоминающий осциллограф ALEX2102CEX. На экране последнего фиксируется изменение усилия $P_{сж}$ вплоть до разрушения таблетки. Максимальное значение $P_{сж}$ соответствует усилию разрушения таблетки при сжатии. Скорость перемещения каретки, а соответственно, скорость нагружения испытуемой таблетки, регулируется за счет изменения напряжения, подаваемого на электродвигатель от блока питания.

На созданном устройстве была проведена серия экспериментальных исследований, целью которой является оценка влияния скорости нагружения таблетки на величину усилия ее разрушения, а соответственно, на точность определения этого параметра.

Методика проведения этих экспериментов заключалась в следующем. В качестве объекта испытаний исследовались таблетки активированного угла массой 250 мг с риской, диаметром 12 мм и толщиной 5 мм. Нагружение таблеток осуществлялось при трех значениях скорости v_0 пережевывания пуансона: 63, 120 и 240 мм/мин. При постоянной скорости v осуществляется разрушение 10 таблеток с получением осциллограмм изменения усилия их разрушения.

По полученным осциллограммам определялось усилие разрушения каждой таблетки F_p , а затем вычислялось среднее арифметическое значение усилия разрушения всех десяти таблеток $F_{p\text{ сред}}$. После этого, определялось величина абсолютной погрешности измерения усилия разрушения таблеток при данной постоянной скорости их нагружения.

После обработки полученных данных проведена оценка влияния скорости нагружения таблеток в процессе их испытаний на величину усилия разрушения и точность его измерения. В обобщенном виде эти данные приведены в таблице.

Из анализа приведённых данных следует отметить следующие основные положения. Во первых,

с увеличением скорости нагружения среднее значение усилия разрушения таблеток ($F_{p\text{ сред}}$) несколько снижается: с 35,1 Н при $V = 63$ мм/мин до 32 Н – при $V = 240$ мм/мин. Во вторых, по мере увеличения V относительно погрешность определения $F_{p\text{ сред}}$ возрастает с 22,7 % – при $V = 63$ мм/мин до 37,5 – при $V = 240$ мм/мин.

Таблица 1 – Значение усилия разрушения таблеток активированного угла (F_p , $F_{p\text{ min}}$, $F_{p\text{ сред}}$) и величины относительной погрешности ΔF_p его определения при различной скорости V приложения сжимающей нагрузки

Скорость приложения сжимающего усилия V , мм/мин	$F_{p\text{ max}}$, Н	$F_{p\text{ min}}$, Н	$F_{p\text{ сред}}$, Н	ΔF_p , %
63	40	32	35,1	22,7
120	38	28	32,7	30,5
240	40	28	32	37,5

Таким образом, на основе полученных экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что с целью повышением точности определения усилия разрушения таблеток при сжатии скорость приложения сжимающей нагрузки должна составлять 60 ± 5 мм/мин.

УДК 620.17

УСТРОЙСТВО И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТИРАЕМОСТИ ТАБЛЕТОК

Киселев М.Г., Богдан П.С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Одним из основных требований к таблеткам является их механическая прочность, т.е. таблетки должны обладать достаточной прочностью и не должны крошиться. Объективную оценку механических свойств таблеток получают путем проведения испытаний таблеток на раздавливание и истирание. При проведении обоих видов испытаний является обязательным в силу того, что таблетированные препараты, удовлетворяя требованиям по стойкости к раздавливанию, могут иметь легко истираемые края и по этой причине оказаться недоброкачественными.

На сегодня применяется большое количество устройств (тестеров) для проведения этих испытаний. Однако, как показал проведенный анализ, их использование требует уточнения отдельных положений методик и принципиальных схем проведения испытаний. В частности, в тестерах по определению истираемости таблеток используются схемы испытаний, при которых может происходить откалывание (раскалывание) таблеток, что в принципе является недопустимым.

В этой связи представляет значительный как научный, так и практический интерес исследования, направленные на оптимизацию условий проведения испытаний таблеток на истирае-

мость. Решению этих вопросов посвящена данная работа.

Механическая прочность таблеток также характеризуется степенью их истираемости. Истираемость наблюдается при упаковке, фасовке и транспортировке, будучи особенно сильной на фасовочных машинах. Признаком истираемости является образование порошкообразной пыли на таблетках и упаковке.

Форма таблеток не должна изменяться в процессе испытания. Прочность на истирание должна быть не менее 97 %.

На основе проведенного анализа современных устройств, применяемых для испытания таблеток на истираемость, можно отметить следующие основные положения:

1. Используемые в тестерах конструкции, основаны на применении вращающихся барабанов с принудительным перемещением таблеток лопастями, что приводит к их частичному разрушению. Таким образом, в этом случае не воспроизводится условие только истирания таблеток.

2. На сегодня отсутствуют устройства для испытания таблеток, обеспечивающие только их истирание.

Исходя из проведенного анализа из проведенного анализа устройств (тестеров) для определения истираемости таблеток следует отметить следующее. При производстве таблеток их транспортирование от прессы к упаковочной машине происходит с помощью конвейерной ленты. В этом случае таблетки совершают поступательное движение с частичным проскальзыванием относительно поверхности конвейера, а также взаимодействуют между собой, совершая периодическое кратковременное вращение. В этом случае происходит их истирание. В выше рассмотренных конструкциях тестеров происходит соударение таблеток как между собой, так и о стенки барабана, вызывая их частичное разрушение (скалывание), что в принципе не соответствует реальным условиям взаимодействия таблеток при их транспортировании.

В этой связи, для более объективной оценки истираемости таблеток необходимо использование устройства (тестера), которое в максимальной степени воспроизводит условия взаимодействия таблеток при их транспортировании, т.е. при их скольжении относительно движущейся поверхности и взаимодействия между собой в процессе этого движения.

Для проведения экспериментальных исследований было специально разработано устройство определения истираемости таблеток с наклонной осью вращения барабана (рисунок 1).

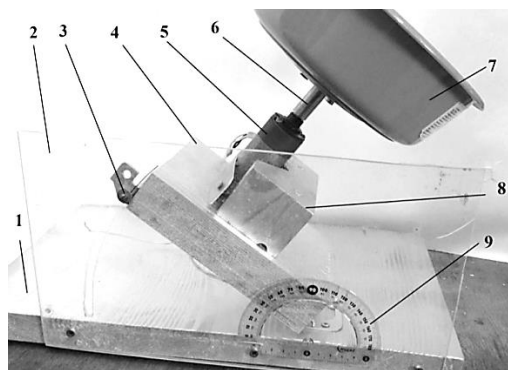


Рисунок 1 – Фотография общего вида устройства испытания таблеток на истираемость с наклонной осью вращения барабана

На массивном основании 1 с возможностью поворота в вертикальной плоскости относительно горизонтальной оси установлена пластина 4. На ее верхней части в призме 8 закреплен электродвигатель постоянного тока 5, на валу которого неподвижно установлена переходная втулка 6. Во внутренней полости барабана свободно установлен сепаратор, выполненный в виде стального кольца наружным диаметром 47 мм, внутренним – 43 мм и высотой 13 мм.

Наружный диаметр сепаратора не превышает величину внутреннего радиуса барабана с

наклонной осью вращения. Во внутреннюю полость сепаратора помещаются испытуемые таблетки.

В этом случае при вращении барабана 3 со скоростью V_0 (рисунок 2) сепаратор 2 вместе с таблетками 1 занимает на наклонной поверхности барабана определенное постоянное положение, т.е. его центр масс (точка O_c) остается практически неподвижным на поверхности барабана.

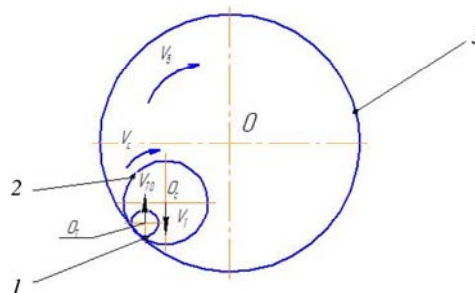


Рисунок 2 – Схема движений сепаратора 2 и таблетки 1 на вращающейся наклонной поверхности барабана 3

При этом сепаратор и вращающаяся поверхность барабана образуют фрикционную пару, в которой ведущим звеном является поверхность барабана, а ведомым – сепаратор. За счет разности скоростей скольжения по диаметру сепаратора последний совершает вращательное движение вокруг центра масс со скоростью $V_{св}$ в направлении, совпадающем с направлением вращения барабана. Находящаяся во внутренней полости сепаратора таблетка также совершает вращательное движение со скоростью $V_{ТО}$ по окружности, ограниченной внутренней поверхностью сепаратора. Одновременно она совершает вращательное движение со скоростью V_T относительно ее центра масс (точка O_T).

Таким образом, в данном случае в ходе испытания таблеток реализуется режим только их истирания, без присутствия соударения, приводящего к разрушению. На интенсивность протекания процесса истирания таблеток, при прочих равных условиях, основное внимание оказывает скорость их вращательного движения при взаимодействии, как с поверхностью барабана, так и друг с другом. Численные значения этих скоростей определяются частотой вращения наклонно установленного барабана, что позволяет в широком диапазоне варьировать режимами проведения испытаний таблеток на истираемость.

Объектом испытания служили таблетки активированного угля массой 250 мг, диаметром 12,5 и толщиной 5,0 мм. При выполнении серии экспериментов, осуществлялось следующее действие. Таблетки в количестве 10 штук помещались в нижнюю часть наклонно установленного барабана.

Предварительно с помощью микрометра измерялись диаметр и толщина каждой таблетки, а

исходная масса 10 таблеток определялась их взвешиванием на аналитических весах с точность 0,1 мг.

После этого включался привод вращения барабана с частотой 40 мин⁻¹. Путем плавного регулирования угла наклона оси барабана определялось его значение, при котором таблетки совершали относительно скольжение по поверхности барабана при достижении ими наибольшей высоты подъема.

Продолжительность испытания составляла 30 минут. После этого таблетки тщательно с помощью мягкой кисточки очищались от пыли, измерялись их диаметр и высота, а также их масса.

В таблице приведены значения диаметров и толщин испытуемых таблеток до и после проведения испытаний.

Из анализа приведенных данных видно, что с увеличением частоты вращения барабана возрастает частота вращения сепаратора, частота вращения таблеток по окружности и частота их вращения вокруг центра масс. Очевидно, что по сравнению с предыдущим вариантом (без сепаратора) в данном случае обеспечиваются управляемые условия более интенсивного изнашивания (истирания) таблеток. При использовании сепаратора происходит интенсивное скольжение плоской

поверхности таблетки по поверхности барабана, а торцевая поверхность таблеток изнашивается в результате ее взаимодействия как с поверхностью сепаратора, так и между соседними таблетками.

Таблица 1 – Значение частоты вращения сепаратора n_c , частоты вращения таблеток внутри сепаратора n_T и частоты их вращения вокруг центра масс n_{T0} при различной частоте вращения барабана n_6

Частота вращения барабана n_6 , мин ⁻¹	Частоты вращения сепаратора n_c , мин ⁻¹	Частоты вращения таблеток внутри сепаратора n_T , мин ⁻¹	Частоты вращения таблеток вокруг центра масс n_{T0} , мин ⁻¹
25	55	39	57
45	107	94	115
68	150	136	136

Исходя из этого, оправдано рекомендовать для проведения испытания таблеток на истираемость использовать метод и устройство с наклонной осью вращения барабана с применением сепаратора. При этом следует подчеркнуть, что в этом случае происходит только истирание таблеток, а их разрушение или откалывание отсутствует.

УДК 004.056:061.68

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО МЕТОДА ПОДАВЛЕНИЯ ПОМЕХ В РАДИОКАНАЛАХ ОХРАННО-ПОЖАРНЫХ СИСТЕМ СИГНАЛИЗАЦИИ

Бокуть Л.В.¹, Деев Н.А.²

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Обмен данными между различными элементами средств охранно-пожарной сигнализации в последнее время все чаще осуществляется с использованием радиоканала, так как в обслуживании радиоканальные системы дешевле, чем проводные. Средства охранной сигнализации обладают следующими основными особенностями функционирования:

– наличие сложной помеховой обстановки, в которых происходит передача данных по радиоканалу;

– параметры среды распространения сигналов непрерывно меняются во времени, что связано с изменением картины многолучевого распространения из-за отражения сигналов от стен, препятствий, движущихся людей и т.д.

– среда передачи данных является открытым каналом, поэтому информация, передаваемая между элементами системы, доступна для внешних наблюдателей, которые могут воспользоваться ею для несанкционированного управления

либо саботирования функционирования средств охранной сигнализации;

– электропитание многих элементов радиоканальных систем осуществляется от химических источников тока с небольшим сроком службы. В связи с этим возникает необходимость использования радиоприемных и радиопередающих трактов, устройств обработки сигналов, протоколов радиообмена, учитывающих повышенные требования к энергетической эффективности.

В современных системах передачи информации используются широкополосные радиосигналы, обеспечивающие энергетическую скрытность радиопередачи.

Широкополосные каналы передачи сообщений подвержены воздействию комплекса помех. Он состоит из флуктуационных шумов приемника, а также из помех, сосредоточенных по времени и частоте, обусловленных действием сторонних источников. Качество приема сообщений зависит от снижения уровня таких помех.

Существуют разнообразные методы борьбы с помехами. Компенсационные методы основаны на выделении из действующего на входе приемника колебания наиболее интенсивных помех и последующей их компенсации. В наибольшей степени удается осуществить подавление одиночных узкополосных помех. В случае, когда действует сумма таких помех с различными спектрами, необходимо выделять из смеси каждую из них, оценивать, а затем вычитать из действующей смеси. Методы линейной фильтрации для выделения узкополосных помех оказываются неэффективными для построения компенсаторов. При подавлении помех подавляется и часть спектральных составляющих широкополосного сигнала.

Целесообразно использовать нелинейные методы выделения и оценивания помех. К ним относятся методы нелинейного оценивания (фильтрации) параметров узкополосной помехи, методы безинерционного нелинейного преобразования в сочетании с линейной фильтрацией [1, 2].

Предлагается рассмотреть комбинированный подход, основанный на разделении полосы спектра принимаемого сигнала на отдельные участки. Предполагается, что на каждом частотном участке может появиться только одна узкополосная помеха.

Статистическое описание помехи задается в виде плотности распределения вероятности мгновенных значений (ПРВ). Если помеха представляет модулированное колебание, то ПРВ его мгновенных значений имеет бимодальный характер, что учитывается при построении нелинейного преобразователя (НП). Оцененные узкополосные помехи компенсируются в вычитающем устройстве. Общая структурная схема компенсатора представлена на рисунке 1.

В случае, когда действует N источников узкополосных помех, схема компенсатора включает N полосовых фильтров (ПФ) и нелинейных преобразователей (НП). После вычитания суммы оцененных помех $\sum y_i^*(t)$ из принимаемой смеси $r(t)$ приемник (ПР) осуществляет дальнейшую обработку сигнала.

Пусть на входе устройства компенсатора действует смесь $r(t)$ сигнала и комплекса помех

$$r(t) = S(t) + \sum_{i=1}^N Q_i y_i(t) + \eta(t) + n(t), \quad (1)$$

где $S(t)$ – полезный сигнал, средняя мощность которого значительно меньше средней мощности помех; $y_i^*(t)$ – узкополосная помеха, средняя частота спектра которой попадает в полосу пропускания ПФ; параметр Q_i принимает два значения 0 и 1, в зависимости от того, присутствует или отсутствует узкополосная помеха на выходе ПФ. Плотность распределения вероятности $W(y_i)$ мгновенных значений помехи считается заданной; $\eta(t)$ – импульсная помеха, плотность распределения мгновенных значений которой

$W(\eta)$ задана; $n(t)$ – широкополосный флуктуационный шум, представляемый белым гауссовским шумом с нулевым средним значением и спектральной плотностью $N_0/2$.

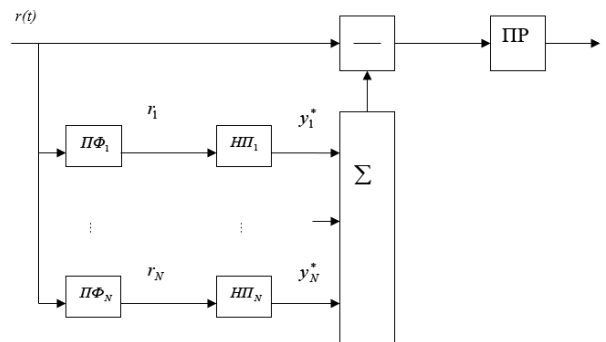


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема компенсатора узкополосных помех

Задача сводится к выделению слабого сигнала $S(t)$ из комплекса помех с максимальным отношением сигнал/ помеха, при этом должно обеспечиваться максимальное подавление помех.

Для определения оптимального алгоритма оценивания помех и их компенсации в соответствии со структурной схемой разобьем полосу спектра $\Delta\omega_s$ принимаемого сигнала на N участков шириной $\Delta\omega_s/N$, предполагая, что в пределах отдельного участка может находиться только одна узкополосная помеха. В этом случае на выходах полосовых фильтров ПФ_i имеем:

$$r_i(t) = S_i(t) + Q_i y_i(t) + \eta_i(t) + n_i(t), \quad (2)$$

где $S_i(t)$, $\eta_i(t)$, $n_i(t)$ – соответствующие реакции полосовых фильтров ПФ_i на действие сигнала импульсной и широкополосной помех. В пределах полосы ПФ_i можно считать среднюю мощность составляющих помех η_i и n_i равной:

$$\delta_{ni}^2 = (S_{\text{и}} + N_0)\Delta\omega_s/(2N), \quad (3)$$

где $S_{\text{и}}$ – спектральная плотность импульсной помехи. Тогда выражение (2) сводится к следующему:

$$r_i(t) = S_i(t) + Q_i y_i(t) + n_{oi}(t), \quad (4)$$

здесь $n_{oi}(t)$ – гауссовский процесс с нулевым средним значением и дисперсией δ_{ni}^2 ; $S_i(t)$ – реакция ПФ_i на действие сигнала.

Процессу оценивания помехи $y_i(t)$ предшествует процедура обнаружения, то есть оценки параметра Q_i . Обнаружение осуществляется при действии мешающих процессов $S_i(t)$, $\eta_{oi}(t)$, которые в совокупности образуют гауссовский процесс с нулевым средним значением и дисперсией:

$$\delta_{oi}^2 = \delta_{ni}^2 + \delta_{Si}^2. \quad (5)$$

Алгоритм обнаружения сводится к сравнению логарифма отношения правдоподобия с порогом

L_n . Считая в первом приближении отсчеты наблюдаемого процесса $r_i(t)$ независимыми, получим:

$$\ln L[r_i(t)] = \frac{1}{T} \int_0^T [\ln w_1(r_i) - \ln w_0(r_i)] dt. \quad (6)$$

Структурная схема обнаружения полосовой помехи приведена на рисунок 2.

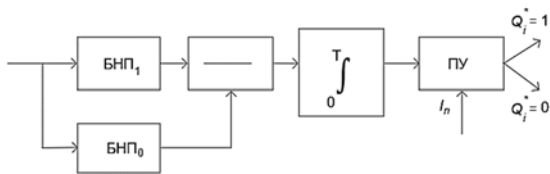


Рисунок 2 – Обнаружитель узкополосной помехи:
БНП₁ – безынерционный нелинейный преобразователь с амплитудной характеристикой $\ln w_1(r_i)$;
БНП₀ – безынерционный нелинейный преобразователь с амплитудной характеристикой $\ln w_0(r_i)$;
T – время накопления

Определение параметра $Q_i^* = \{0,1\}$ необходимо для дальнейшей обработки смеси $r_i(t)$ с целью получения оценки узкополосной помехи $y_i^*(t)$ и ее компенсации. Оценка $y_i^*(t)$ может

быть сформирована на основе нелинейного преобразования $r_i(t)$. При $Q_i^* = 1$ имеем:

$$r_i(t) = y_i(t) + n_{0i}(t) + S_i(t) = y_{0i}(t) + S_i(t), \quad (7)$$

где $y_{0i}(t) = y_i(t) + n_{0i}(t)$ – сумма узкополосной помехи и гауссовского шума $n_{0i}(t)$.

При независимых значениях $n_{0i}(t)$ и $y_i(t)$ плотность распределения вероятностей $w_y(y_{0i})$ определяется сверткой ПРВ $w(y_i)$ и ПРВ $w(n_{0i})$. Учитывая, что сигнал $S_i(t)$ предполагается слабым по сравнению с $y_{0i}(t)$, можно определить характеристику безынерционного нелинейного преобразования, обеспечивающего наилучшую компенсацию помехи $y_{0i}(t)$ и выделения сигнала $S_i(t)$ с наибольшим отношением сигнал/помеха.

Литература

1. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 512 с.
2. Чердынцев В.А., Деев Н.А. Подавление комплекса помех в каналах связи / В.А. Чердынцев, Н.А. Деев // Известия Белорусской инженерной академии. – 2002. – № 2. – С. 31–36.

УДК 621.382.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАТНОЙ ВЕТВИ ВОЛЬТАМЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЕВОГО ДИОДА МНОГОЧАСТИЧНЫМ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

Борздов А.В.¹, Борздов В.М.¹, Кучинский П.В.², Петлицкий А.Н.³

¹Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

²Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ
Минск, Республика Беларусь

³ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл»
Минск, Республика Беларусь

Строгое численное моделирование вольтамперных характеристик кремниевых диодов с р-п-переходом является на сегодняшний день актуальной задачей в связи с необходимостью прогнозирования напряжения пробоя прибора с заданными конструктивно-технологическими параметрами, а также для изучения шумовых характеристик диодов в предпробойном режиме. Для адекватного моделирования работы диодов при обратном смещении необходим учет физических процессов, приводящих к генерации носителей заряда в области пространственного заряда р-п-перехода. В связи с уменьшением геометрических размеров приборных структур и увеличением уровней легирования их рабочих областей существенно важным является учет процессов генерации носителей заряда, обусловленных межзонным туннелированием и лавинным умножением вследствие ударной ионизации. Также вследствие наличия дефектов в ре-

альной кристаллической структуре кремния существенное влияние на рабочие характеристики диода может оказывать процесс генерации-рекомбинации носителей заряда через ловушки [1, 2].

В настоящей работе представлены результаты моделирования обратной ветви вольтамперной характеристики кремниевых диодов многочастичным методом Монте-Карло. Данный метод является весьма эффективным при решении подобных задач, поскольку позволяет учесть все наиболее важные процессы рассеяния электронов и дырок в полупроводнике и процессы генерации-рекомбинации носителей заряда. Метод также позволяет включить эффекты, связанные с необходимостью учета полной зонной структуры полупроводника [3].

При моделировании процессов переноса электронов и дырок в диоде, а также для расчета электрического потенциала и напряженности

электрического поля используется так называемое одномерное приближение. В этом случае полагается, что поперечные размеры диода намного больше расстояния между электродами в направлении, перпендикулярном плоскости р-п-перехода. Тогда краевыми эффектами можно пренебречь и в рамках самосогласованного моделирования решается одномерное уравнение Пуассона вдоль направления, перпендикулярного плоскости р-п-перехода. Изменение напряженности электрического поля и электростатического потенциала в поперечном сечении структуры не учитывается. Контакты электродов с кремнием моделируются как идеальные омические.

В рамках самосогласованного моделирования процессов переноса на основе многочастичного метода Монте-Карло применяется так называемый метод частиц, когда реальный ансамбль электронов и дырок заменяется ансамблем частиц с некоторым эффективным зарядом, большим элементарного. Основы метода частиц, в частности применительно к моделированию полупроводниковых приборов, изложены в [4]. В рамках этого подхода рассчитывается объемная плотность подвижного заряда, входящая в уравнение Пуассона. Уравнение Пуассона решается через определенные интервалы времени, называемые временем коррекции поля. Величина времени коррекции поля является достаточно малой и определяется, в частности, размерами и уровнями легирования моделируемых областей.

Процессы переноса электронов и дырок рассматриваются в рамках аналитического описания законов дисперсии с учетом эффекта непараболичности в зоне проводимости и валентной зоне, соответственно. Включаются процессы рассеяния электронов и дырок на акустических и оптических фонах, рассеяние на ионизированной примеси и межзонная ударная ионизация. Перенос электронов учитывался в X и L -долинах, а перенос дырок – в зоне тяжелых и легких дырок, а также в спин-отщепленной зоне [5].

Процессы ударной ионизации электронами и дырками рассматриваются как дополнительные механизмы рассеяния в соответствии с моделями, основанными на расчете интенсивностей этих процессов с учетом полной зонной структуры кремния [6, 7].

На данный момент существует ряд моделей процесса межзонного туннелирования, используемых как для расчета электрических характеристик приборных структур в рамках дрейфово-диффузионного подхода, так и методом Монте-Карло [1–3]. При расчетах нами использовалась модель, описанная в [1, 2]. В соответствии с этой моделью скорость генерации-рекомбинации при межзонном туннелировании R_{btt} определяется как:

$$R_{\text{btt}} = ADE^p \exp(-B/E), \quad (1)$$

где E – локальная напряженность электрического поля, $p = 2,5$, а A , D и B – параметры, значения которых обсуждаются в [1–3].

Скорость генерации-рекомбинации через ловушки R_{trap} определяется в соответствии с моделью [1] и имеет следующий вид

$$R_{\text{trap}} = (1 + \Gamma(E)) R_{\text{SRH}}, \quad (2)$$

где Γ – функция, зависящая от локального электрического поля и учитывающая туннелирование через ловушки в зависимости от концентрации носителей, захваченных ловушками, а R_{SRH} – скорость генерации-рекомбинации в соответствии со стандартной моделью Шокли-Рида-Холла.

Формулы (1)–(2) используются для расчета объемной плотности заряда сгенерированного в единицу времени. Сгенерированный заряд преобразуется в электронные и дырочные частицы в соответствии с алгоритмом метода частиц.

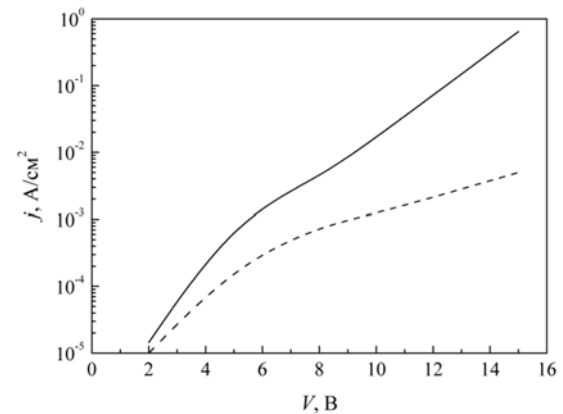


Рисунок 1 – Зависимость плотности тока в диоде от обратного напряжения между электродами: сплошная кривая – с учетом межзонного туннелирования; штриховая – без учета этого процесса

На рисунке 1 в качестве примера представлены рассчитанные зависимости плотности тока в диоде j от обратного напряжения между электродами V . Температура моделирования равна 300 К. р-п-переход полагается резким. Уровни легирования n - и p -областей составляют 10^{25} и $5 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ соответственно. В данном случае уровень легирования n -области взят на порядок меньшим, чем в расчетах [2] с целью более эффективного использования машинного времени при реализации метода частиц, описанного выше.

Сплошная кривая на рисунке 1 соответствует расчетам, включающим генерацию носителей заряда в соответствии со всеми перечисленными механизмами, а штриховая кривая соответствует расчетам без учета межзонного туннелирования, определяемого формулой (1). Необходимо отметить, что выражение (2) для скорости генерации через ловушки включает такие параметры, как время жизни носителей заряда и уровни

энергии ловушек. В качестве модельного приближения в [2] полагается, что уровни энергии ловушек совпадают с серединой запрещенной зоны, а величины таких параметров, как времена жизни носителей выбираются исходя из наилучшего согласия рассчитанных значений плотности тока с экспериментальными данными. В наших расчетах мы не ставили задачи детального исследования этой проблемы и ограничились определенным диапазоном значений этих параметров в соответствии с [2]. При этом во всех случаях степень влияния генерации носителей заряда через ловушки на величину плотности тока оказалась существенно меньшей, чем генерации путем межзонного туннелирования.

Таким образом, результаты численного моделирования на основе многочастичного метода Монте-Карло позволяют сделать вывод о том, что в рассматриваемых условиях важнейшим механизмом, влияющим на ток диода при обратном смещении на электродах, является межзонное туннелирование. При этом расчеты показали, что лавинное умножение происходит в основном вследствие ударной ионизации носителями, сгенерированными в области пространственного заряда в результате межзонного туннелирования.

УДК 621.382

КОРРЕКЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ РАСТЕКАНИЯ ТЕПЛА В МОЩНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ

Бумай Ю.А., Васьков О.С., Нисс В.С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Методом тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии (ТРДС) с использованием непрерывных и дискретных спектров теплового сопротивления во временной области [1] проведен анализ электротепловой модели мощных полупроводниковых приборов. Исследовались тепловые параметры микросхем линейных стабилизаторов напряжения 5318EP-015, в металлокерамическом корпусе H02.8-1B.

Известно, что переходная зависимость кумулятивного теплового сопротивления R^* с несколькими временами релаксации τ_i , (при распространении тепла по элементам структуры прибора с тепловыми сопротивлениями r_i) при нагревании образца имеет вид:

$$R^*(t) = \sum_i^n r_i \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right)\right). \quad (1)$$

На рисунке 1 представлена временная зависимость кумулятивного теплового сопротивления R^* микросхемы линейного стабилизатора напряжения 5318EP-015.

Структуру теплового сопротивления определим из дифференциального спектра первого порядка во временной области [2]:

Литература

1. Hurkx G.A.M. A new analytical diode model including tunneling and avalanche breakdown / G.A.M. Hurkx [et al.] // IEEE Trans. Electron Devices. – 1992. – Vol. 39, no. 9. – P. 2090–2098.
2. Hurkx G.A.M. A new recombination model for device simulation including tunneling / G.A.M. Hurkx, D.B.M. Klaassen, M.P.G. Knuvers // IEEE Trans. Electron Devices. – 1992. – Vol. 39, no. 2. – P. 331–338.
3. Jiao Y. Comparison of band-to-band tunneling models in Si and Si-Ge junctions / Y. Jiao [et al.] // Journal of Semiconductors. – 2013. – Vol. 34, no. 9. – P. 092002-1–092002-5.
4. Хокни Р. Численное моделирование методом частиц: пер. с англ / Р. Хокни, Дж. Иствуд. – М.: Мир, 1987. – 640 с.
5. Борздов В.М. Оценка эффективной пороговой энергии межзонной ударной ионизации в глубокосубмикронном кремниевом n-канальном МОП-транзисторе / В.М. Борздов [и др.] // Микроэлектроника. – 2014. – Т. 43, № 3. – С. 188–192.
6. Kamakura, Y. Impact ionization model for full band Monte Carlo simulation / Y. Kamakura [et al.] // J. Appl. Phys. – 1994. – Vol. 75, no. 7. – P. 3500–3506.
7. Kunikiyo T. A model of impact ionization due to the primary hole in silicon for a full band Monte Carlo simulation / T. Kunikiyo [et al.] // J. Appl. Phys. – 1996. – Vol. 79, no. 10. – P. 7718–7725.

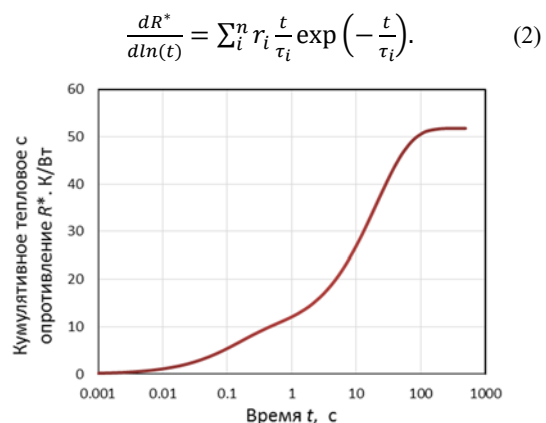
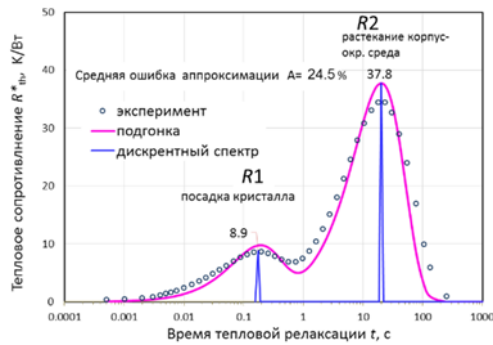


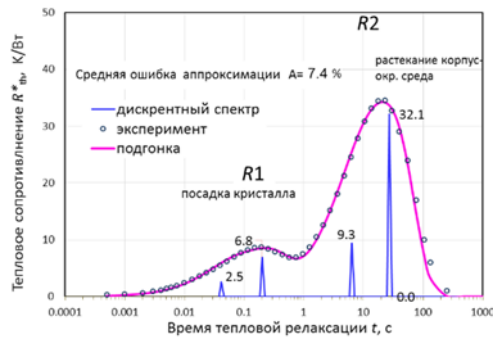
Рисунок 1 – Зависимость кумулятивного теплового сопротивления R^* от времени разогрева образца

Как видно из рисунка 2 непрерывный спектр микросхемы 5318EP-015 имеет две характерные области (два пика), обозначенные $R1$ и $R2$, которые можно идентифицировать как тепловое сопротивление посадки кристалла и переходной границы корпус-окружающая среда [3]. Аппроксимация с двумя временами релаксации τ_i для

данных образцов имеет недостаточное приближение к экспериментальным данным ($\bar{A} = 24,5\%$, рисунок 2, а). На рисунке 2, б представлена аппроксимация с 4-мя временами релаксации τ_i , дающая более точное приближение ($\bar{A} = 7,4\%$).



а



б

Рисунок 2 – Непрерывный и дискретный спектр R^* с экспоненциальной аппроксимацией $\sum r_i k \cdot \exp(-t^k/\tau_i)$: а – $k = 1$, $n = 2$, б – $k = 1$, $n = 4$

Вместе с тем указанное выше описание переходных тепловых процессов экспоненциальным приближением в виде уравнения (1) имеет ограничения. Так на начальном участке нагрева в приповерхностном слое полупроводниковой структуры наблюдается корневая зависимость от времени температуры перегрева активной области прибора и соответственно теплового сопротивление прямо пропорционально $t^{0,5}$) [4].

Второе ограничение приближения (1) связано с послойным тепловым растеканием. Анализ экспериментальных данных электротепловых измерений образцов разного типа мощных полупроводниковых транзисторов показывает, что лучшее приближение в таком случае достигается за счет экспоненциальной аппроксимацией функцией вида $\exp(-t^k/\tau_i)$ с степенным показателем k в первом приближении равном 0,8.

$$R^*(t) = \sum_i^n r_i \left(1 - \exp\left(-\frac{t^k}{\tau_i}\right)\right). \quad (3)$$

Для поиска оптимального значения k определим функцию Φ в виде двойного логарифма от R^* .

$$\Phi(t) = \sum_i^n \lg\left(-\ln\left(1 - \frac{R^* - r_{i-1}}{r_i}\right)\right) = \sum_i^n \lg(\tau_i) + kt \quad (4)$$

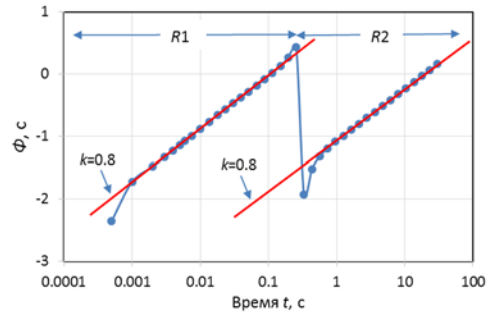


Рисунок 3 – Подгонка функции Φ методом линейной регрессии с наклоном $k = 0,8$

На участках $R1$ и $R2$ функция Φ близка к линейной с угловым коэффициентом $k = 0,8$.

Временное распределение коэффициента k представлено на рисунке 4.

$$k(t) = \frac{d\Phi}{dt}. \quad (5)$$

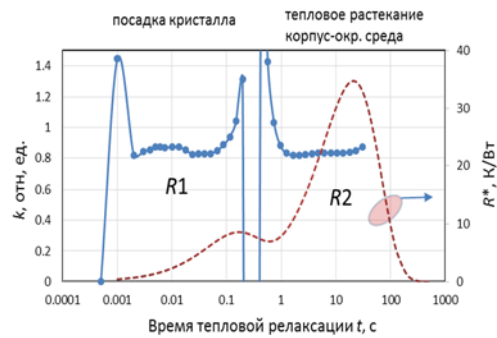


Рисунок 4 – Иллюстрация временного распределения углового коэффициента k

На основе выражения (3) и определенного значения k (рисунок 3,4) проведена аппроксимация данных для спектра образцов 5318EP-015, функциями вида $\exp(-t^k/\tau_i)$ со степенным показателем $k = 0,8$ и двумя временами релаксации τ_i , которая показала более высокую точность приближения ($\bar{A} = 3\%$) (рисунок 5), чем в первом случае (рисунок 2).

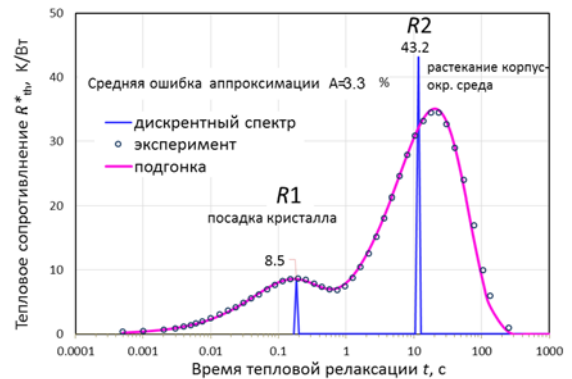


Рисунок 5 – Непрерывный и дискретный спектр R^* с экспоненциальной аппроксимацией $\sum r_i k \cdot \exp(-t^k/\tau_i)$: $k = 0,8$, $n = 2$

Литература

1. Нисс В.С. Оценка тепловых параметров мощных биполярных транзисторов методом тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии / В.С. Нисс, О.С. Васьков, А.С. Турцевич, А.Ф. Керенцев, В.К. Кононенко // Приборы и методы измерений. – 2015. – Т. 6, № 2. – С. 249–256.

2. Васьков О.С. Диагностика технологических характеристик мощных транзисторов с помощью релаксационного импеданс-спектрометра тепловых процессов / О.С. Васьков, В.С. Нисс, В.К. Кононенко, А.С. Турцевич, И.И. Рубцевич, Я.А. Соловьев, А.Ф. Керенцев // Изв. вузов. Материалы электронной техники. – 2014. – № 1. – С. 47–52.

3. Бумай Ю.А. Анализ тепловых параметров линейных стабилизаторов напряжения / Ю.А. Бумай, О.С. Васьков, В.С. Нисс, В.В. Грибович, А.А. Цивако // Приборостроение–2019: материалы 12 Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 13–15 ноября 2019 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: О.К. Гусев (предс.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2019. – С. 264–266.

4. Zakgeim A.L. Comparative Analysis of the Thermal Resistance Profiles of Power Light-Emitting Diodes Cree and Rebel Types / A.L. Zakgeim, A.E. Chernyakov, A.S. Vaskou, V.K. Kononenko, V.S. Niss // EuroSimE 2013: 14th Intern. Conf. on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems. – 2013. – № 01. – P. 1/7–7/7.

УДК 667.7 + 681.7

ФЛУОРИСЦЕНТНЫЕ ПИГМЕНТЫ ДЛЯ ПЕЧАТНЫХ КРАСОК НА ОСНОВЕ ОКСИСУЛЬФИДОВ РЗЭ

Гайдук Ю.С.¹, Голодок Р.П.², Моховиков М.А.¹, Савицкий А.А.¹, Паньков В.В.¹

¹Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

²Институт порошковой металлургии НАН Беларуси
имени академика О.В. Романа
Минск, Республика Беларусь

Люминофоры на основе соединений редкоземельных элементов отличаются высоким квантовым выходом люминесценции, термической и химической стабильностью и находят применение в различных областях науки и техники. Разработка новых составов и создание экономически целесообразных технологий производства, повышение эксплуатационных характеристик известных люминофоров является актуальной научно-практической задачей. По сравнению с люминофорами на основе оксидов редкоземельных элементов [1], материалы на основе оксисульфидов редкоземельных элементов отличаются более высокой интенсивностью свечения, особенно при возбуждении длинноволновым УФ-излучением (360 нм), и более сложными способами производства. В настоящей работе представлены результаты исследования порошков люминофоров, полученных восстановлением смесей сульфатов редкоземельных элементов (сульфата иттрия и активирующих добавок).

Методика эксперимента. Рентгенографические исследования проводились при помощи дифрактометра ДРОН-3 (Со_{Kα}-излучение).

Метод СЭМ применяли для изучения структуры поверхности поликристаллических и плёночных образцов. Образцы изучали при помощи сканирующего электронного микроскопа LEO 1420.

Спектры флуоресценции при длине волны возбуждения 270 и 360 нм получены для образцов различного состава (концентрации активирующих добавок) на спектрофлуориметре «Carry Eclils» (производство Varian, Австралия).

Метод ПЭМ применяли для изучения размеров и морфологии структуры композиций на микроскопе Hitachi H-800 с ускоряющим напряжением 200 кэВ. Суспензию пигмента наносили на поливинилформальевые опорные сетки.

Результаты и обсуждение. Интенсивность свечения неорганических люминофоров определяется не только химическим составом, но и особенностями морфологии, дисперсностью и гранулометрическим составом порошка пигмента. Традиционным способом получения оксисульфидов, обеспечивающих достаточно высокий уровень свечения в тонких пленках (краскооттиках) является ампульный метод, являющийся экономически нецелесообразным при получении больших количеств порошков. Другие известные методы вследствие наличия загрязнений не обеспечивают достаточного для пигментных целей качества продукта, или требуют проведения сложных дополнительных операций.

Путем сочетания состава (оптимального количества активатора), условий синтеза (восстановитель, температура и время) смеси сульфатов и последующей механической обработки продукта достигнуты удовлетворительные показатели с целью использования порошков оксисульфидов иттрия в качестве пигментов печатных красок.

Размеры кристаллитов для порошковых образцов, синтезированных 600 °С, составляли 20 нм. В процессе восстановления смеси сульфатов РЗЭ формировалась кубическая структура твердого раствора на основе оксисульфида иттрия Y₂O₂S (карточка № 43-1036) (рисунок 1).

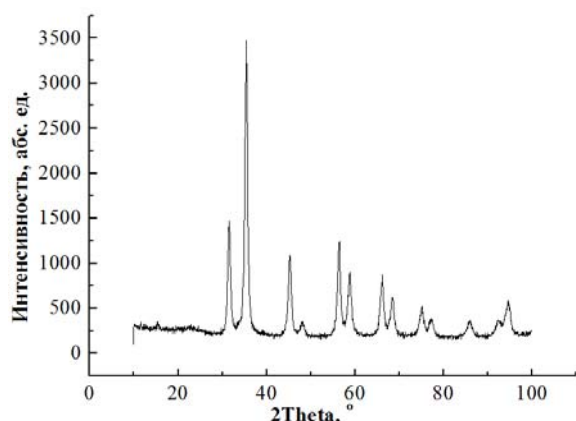


Рисунок 1 – Спектр РФА пигмента на основе оксисульфида иттрия

Максимум флуоресценции при возбуждении УФ-источником с длиной волны 360 нм наблюдается при 623 нм (рисунок 2), при возбуждении источником с длиной волны 270 нм флуоресценция почти отсутствует.

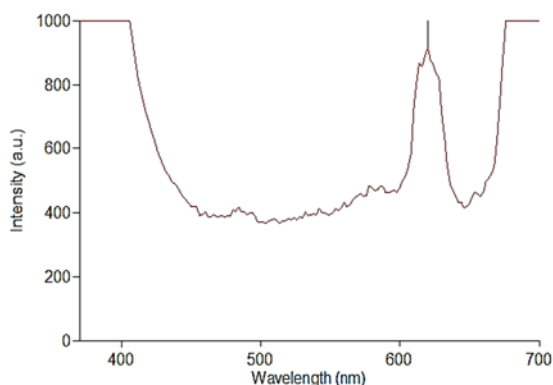
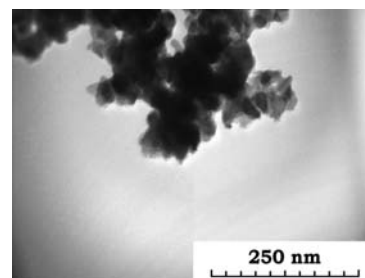


Рисунок 2 – Спектр флуоресценции (излучения) пигмента на основе оксисульфида иттрия (длина волны возбуждения 360 нм)

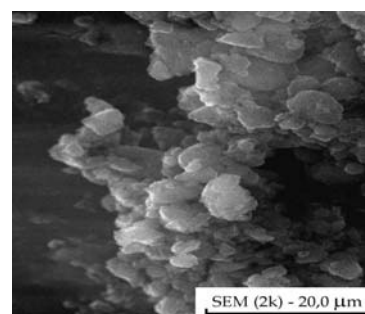
Стандартные серии флуоресцентных пигментов имеют размер частиц 3–6 мкм. Средний размер частиц полученных пигментов, оцененный по микрофотографиям, составляет ≈ 2 мкм. Достаточно узкое распределение частиц по размерам позволяет получить качественное ровное покрытие.

В таблице 1 представлены основные характеристики пигмента красного цвета свечения.

Согласно данным СЭМ, порошок пигмента на основе Y_2O_2S (рисунок 3) представляет собой смесь частиц неправильной формы с размером ~ 2 мкм. Порошок состоит из довольно однородных частиц, частично агломерированных. Отдельные крупные частицы размером до 5,0 мкм представляют собой агломераты сплюснутых частиц.



а



б

Рисунок 3 – ПЭМ (а) и СЭМ (б) изображения пигмента красного свечения

Таблица 1 – Основные характеристики пигмента красного цвета свечения

Показатель	Значение
Отенок	Бесцветный
Стойкость к растворителям	Стоек в водной среде и органических растворителях
Насыпная плотность, г/100 мл	
Средний размер частиц, мкм	2,0
Маслоемкость, г/100 г	42,8
Термическая стабильность, °С	600 °С

Выводы. Предложены составы и масштабируемая экономически конкурентная технология изготовления УФ-возбуждаемых флуоресцентных пигментов на основе оксисульфида иттрия.

Разработанные флуоресцентные пигменты обладают высокой интенсивностью свечения, малым размером частиц, высокой термической и химической стабильностью. Пигменты пригодны для использования в составе печатных красок (трафаретных, офсетных и др.) при УФ-возбуждении излучением с длиной волны 360 нм, в том числе на основе бесцветных связующих.

Литература

- Haiduk Yu.S., Khort A.A., Makhnach L.V., Usenka A.E., Savitsky A.A., Pankov V.V. Sonochemical synthesis of (Y, Eu) $2O_3$ phosphors // Materials 12 Intern. Conf. "Instrumentation-2019", Minsk, November 14–16, 2019 / Belarusian National Technical University, Minsk, 2019. – P. 277–278.

УДК 669.(6–8):539

МИКРОСТРУКТУРА СПЛАВА Sn-Zn-Bi-Ga, ПОЛУЧЕННОГО ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ЗАТВЕРДЕВАНИЕМ

Гусакова О.В.¹, Шепелевич В.Г.²¹Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова БГУ
Минск, Республика Беларусь²Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Переход на экологически чистую пайку привел к разработке широкого круга сплавов, в той или иной степени пригодных для замены эвтектики Sn-Pb. В частности, широко разрекламированные сплавы Sn-Cu и Sn-Ag-Cu, имеют более высокую температуру плавления, чем Sn-Pb, что приводит к отрицательному избыточному температурному воздействию на элементы печатных плат. Эвтектический сплав Sn – 14,2 ат.% Zn имеет температуру плавления 198 °С наиболее близкую к температуре плавления эвтектики Sn-Pb (183 °С). Однако он обладает низкой коррозионной стойкостью из-за высокой концентрации цинка. Для повышения коррозионной стойкости и растекаемости, а также улучшения механических свойств, применяют дополнительное легирование висмутом, индием, галлием, которое при квазиравновесном затвердевании приводит к неоднородной микроструктуре и расширению температурного интервала плавления [1]. Поэтому актуальность исследований обусловлена практической важностью создания материалов для бессвинцовой пайки с узким интервалом и различной температурой плавления и микродисперсной структурой.

В работе представлены результаты исследования зеренной структуры и микроструктуры фольги, полученной методом сверхбыстрой закалки из расплава. В этом методе для получения фольги использовался медный барабан вращающийся с линейной скоростью 20 м/с. На внутреннюю отполированную поверхность барабана выливали небольшой объем расплава (0,2–0,3 г), который растекался тонким слоем и затвердевал в виде фольги толщиной 50–70 мкм. Скорость охлаждения расплава, достигаемая при сверхбыстрой закалке из жидкого состояния не ниже 10^5 К/с.

Для изготовления фольги использовался предварительно приготовленный эвтектический сплав Sn – 14,2 ат.% Zn – 1,7 ат.% Bi, в который добавлялся Ga. В работе представлены результаты исследования фольги сплава Sn – 12,2 ат.% Zn – 1,6 ат.% Bi – 5,8 ат.% Ga.

Рентгеноструктурные исследования, показали, что на дифрактограмме фольги сплава Sn – 12,2 ат.% Zn – 1,6 ат.% Bi – 5,8 ат.% Ga присутствуют дифракционные линии (0002, 100, $10\bar{1}$ 1, $10\bar{1}$ 2, $10\bar{1}$ 3, и др), принадлежащие цинку а также пики (200, 101, 211, 112 и др) соответствующие фазе β -Sn, что согласуется с равновесными диа-

граммами бинарных сплавов компонентов, входящих в состав фольги.

Изображения микроструктуры поверхности исходной фольги исследуемого сплава, полученные через 2 часа после её изготовления в отраженных электронах на растровом электронном микроскопе, представлены на рисунке 1.

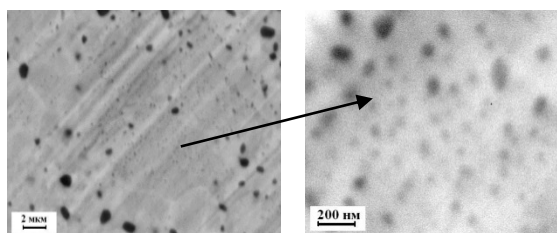


Рисунок 1 – Микроструктура исходной фольги сплава Sn – 12,2 ат.% Zn – 1,6 ат.% Bi – 5,8 ат.% Ga

В микроструктуре фольги присутствуют темные включения. Выявляются участки, с большим количеством включений со средним размером 110 нм. По границам этих участков локализованы крупные включения размером до 1 мкм. Методом случайных секущих определено распределение хорд случайных секущих на сечениях включений по размерным группам (рисунок 2).

На рисунке 2 приведено распределение Zn, Bi и Ga вдоль линии сканирования L – L¹, полученное методом рентгеноспектрального микроанализа. Наблюдаемые включения содержат цинк. Концентрация цинка в участках свободных от крупных включений уменьшается до 5 ат.%. Концентрация Ga и Bi во включениях уменьшается, а в матрице находится в пределах 6 и 1,6 ат.%, соответственно.

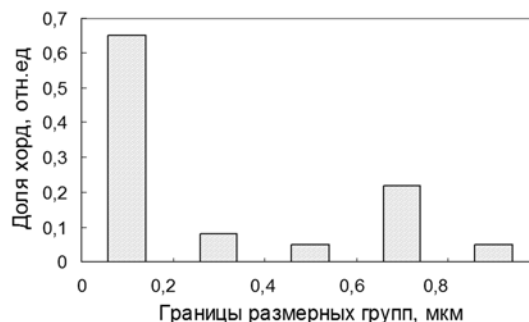


Рисунок 2 – Распределение хорд случайных секущих на сечениях включений по размерным группам

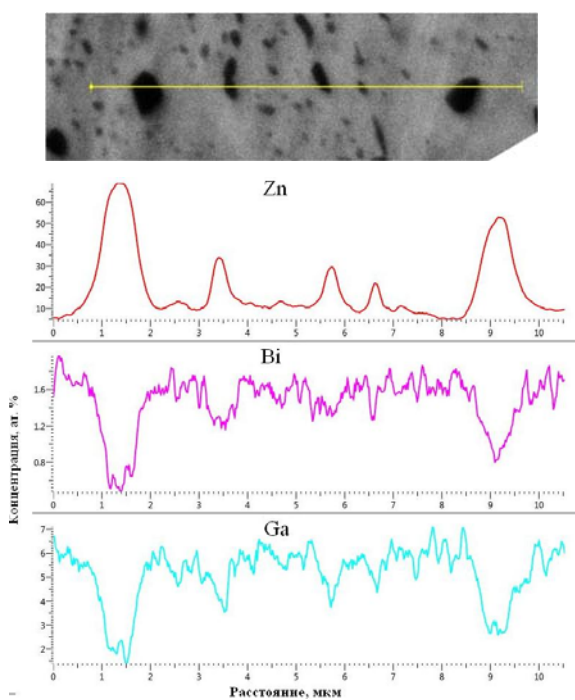


Рисунок 3 – Распределение концентраций Zn, Bi и In вдоль линии сканирования L-L¹

Методом дифракции обратно отраженных электронов исследована зеренная структура фольги сплава Sn – 12,2 ат. % Zn – 1,6 ат. % Bi – 5,8 ат. % Ga. На рисунке представлена зеренная структура у поверхности фольги, прилегающей к кристаллизатору.

Полученные результаты позволяют утверждать, что при высокоскоростном затвердевании сплава Sn – 12,2 ат. % Zn – 1,6 ат. % Bi – 5,8 ат. % Ga кристаллизация протекает с образованием пересыщенного твердого раствора Zn, Bi и Ga в Sn. Согласно равновесной диаграмме состояния [2] при комнатной температуре в Sn растворяется 7,1 ат. % Ga, поэтому весь Ga, введенный в фольгу, находится в твердом растворе. Показано, что высокоскоростное затвердевание повышает растворимость Bi в Sn [3]. Однако равновесная растворимость цинка, в олове составляет 0,36 ат. %. Поэтому при комнатной температуре наблюдается распад пересыщенного твердого раствора с выделением включений цинка. В течение 2 часов после изготовления формируются наноразмерные включения в объеме зерна. Наблюдаются равноосная и вытянутая форма включений. Более крупные включения до 1 мкм на границах зерен вырастают за счет сравнительно большей скорости диффузии по границам, чем объемная.

Наблюдения за процессами старения в фольге исследуемого сплава показали, что область у границы зерна постепенно обедняется включениями цинка, а их размер на границе зерна растет. На рисунке 5 приведен пример микроструктуры фольги через 2 000 ч после изготовления.

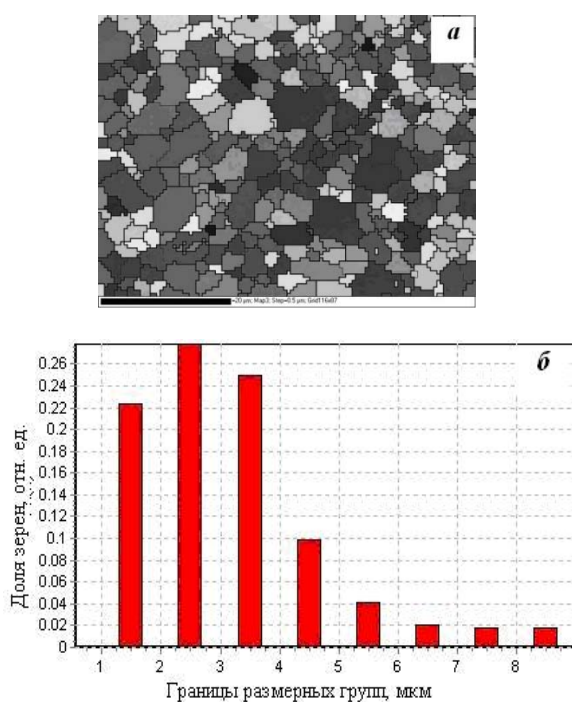


Рисунок 4 – Зеренная структура фольги сплава Sn – 12,2 ат. % Zn – 1,6 ат. % Bi – 5,8 ат. % Ga: а – карта зеренной структуры; б – распределение зерен по размерным группам

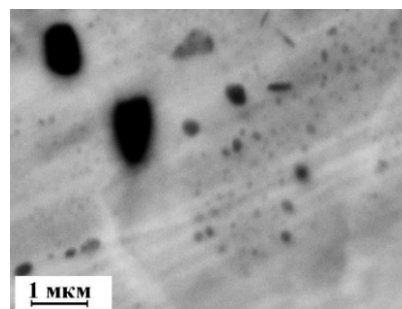


Рисунок 5 – Микроструктура фольги сплава Sn – 12,2 ат. % Zn – 1,6 ат. % Bi – 5,8 ат. % Ga через 2 000 ч старения

Таким образом, добавление в эвтектический сплав Sn – Zn – Bi галлия (5,8 ат. %) приводит к стабилизации микроструктуры.

Литература

1. Kim Young-Sin, Effect of composition and cooling rate on microstructure and tensile properties of Sn–Zn–Bi alloys / Young-Sin Kim, Keun-Soo Kim, Chi-Won Hwang, Katsuaki Sukanuma // Journal Alloys and Compounds. – 2003. – V. 352. – P. 237–245.
2. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник: в 3 т. – Т.2 / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. – 1997. – 1024 с.
3. О.В. Гусакова, В.Г. Шепелевич Микроструктура быстрозатвердевших сплавов системы Sn–Zn–Bi–In // Физика металлов и металловедение. – 2018. – Том 119, № 5. – С. 510–517.

УДК 621.382

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПОДВИЖНОСТИ В ЭЛЕМЕНТАХ ФЛЕШ-ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ КОРОТКОКАНАЛЬНЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

Жевняк О.Г., Жевняк Я.О.

Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Введение. Тенденции развития современных флеш-технологий на основе короткоканальных кремниевых МОП-транзисторов с плавающим затвором направлены на дальнейшее уменьшение активных элементов этих транзисторов [1]. Но этот процесс сдерживается необходимостью лимитирования значений паразитных туннельных токов, возникающих в канале транзистора на плавающий затвор, а также резким снижением подвижности электронов в канале прибора [1–3], что может привести к деградации хранящейся на элементе флеш-памяти информации. Цель настоящей работы – путём численного моделирования электронного переноса в элементах флеш-памяти на основе короткоканальных МОП-транзисторов с плавающим затвором исследовать влияние стокового и затворного напряжения на двумерные распределения подвижности электронов по активной области транзистора и определить области прибора с максимальной деградацией подвижности.

Приборная структура. На рисунке 1 приведена структурная схема МОП-транзистора с плавающим затвором. В настоящей работе исследовался прибор со следующими конструктивно-технологическими параметрами:

длина канала $L_{ch} = 0,2$ мкм, толщина подзатворного окисла $d_{окс} = 6$ нм, толщина туннельного окисла $d_{тун} = 2$ нм, толщина плавающего затвора $d_{плав} = 2$ нм, концентрация донорной примеси в областях истока и стока $N_D = 10^{26}$ м⁻³, концентрация акцепторной примеси в подложке $N_A = 10^{24}$ м⁻³, глубина залегания истоковой и стоковой областей в подложку $d_j = 100$ нм. Напряжения на стоке V_D и затворе V_G равнялись 1, 2 и 3 В.

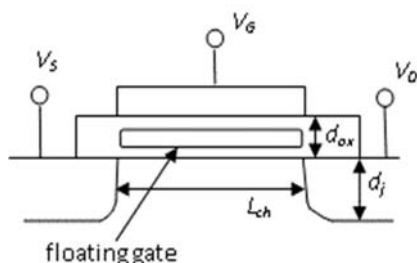


Рисунок 1 – Структурная схема моделируемого элемента флеш-памяти

Методы исследования. В настоящей работе рассчитаны двумерные распределения значений подвижности электронов вдоль длины канала и в

глубь подложки (в направлении залегания истоковой и стоковой областей). Данные распределения были получены на основе моделирования электронного переноса в канале МОП-транзистора методом Монте-Карло вместе с самосогласованным решением уравнения Пуассона. Алгоритмы такого моделирования приведены в работах [4–6].

Значение подвижности в любой области транзистора определяется как коэффициент пропорциональности между дрейфовой скоростью электронов в этой области прибора и напряжённостью электрического поля в ней. Однако в МОП-транзисторах с плавающим затвором, являющихся базовым элементом флеш-памяти, есть участки, где перенос может осуществляться не по дрейфовому механизму. В них величина подвижности рассчитывалась по формуле:

$$\mu = \frac{e \tau}{m}, \quad (1)$$

где τ – среднее время свободного пробега электронов на этом участке.

Результаты моделирования и их обсуждение. На рисунках 2 и 3 приведены полученные двумерные распределения подвижности электронов по активной области исследуемого транзистора с плавающим затвором (на 200 нм по длине канала и на 170 нм в глубину подложки) при $V_G = 2$ В (рисунок 2) и $V_D = 2$ В (рис. 3).

Полученные результаты моделирования показывают, что в исследуемых структурах наблюдается сильно неоднородное распределение подвижности электронов. В направлении в глубину подложки (от границы раздела Si/SiO₂) происходит существенное увеличение величины подвижности. При этом на расстояниях по направлению к подложке, не превышающих величины d_j (т.е. размеров залегания истоковой и стоковой областей МОП-транзистора с плавающим затвором в целом наблюдается несущественное увеличение величины подвижности. Но при движении электронов дальше в глубину подложки (за пределы залегания истоковой и стоковой областей) происходит довольно стремительное (в несколько раз) увеличение величины подвижности электронов. Это во многом обусловлено тем, что электрические поля в этой области невелики, тогда как энергия электронов, разогретых при дрейфе в канале транзистора далека от тепловой, что и способствует формальному увеличению подвижно-

сти. Наименьшее же значение подвижности электронов наблюдается в конечном участке канала и вблизи границы раздела Si/SiO₂.

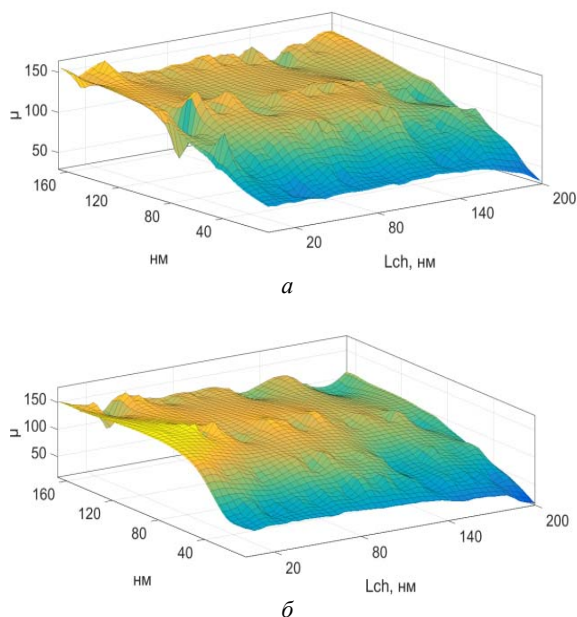


Рисунок 2 – Пространственные распределения подвижности в моделируемых элементах флеш-памяти при $V_G = 2$ В: а – $V_D = 1$ В; б – $V_D = 3$ В;

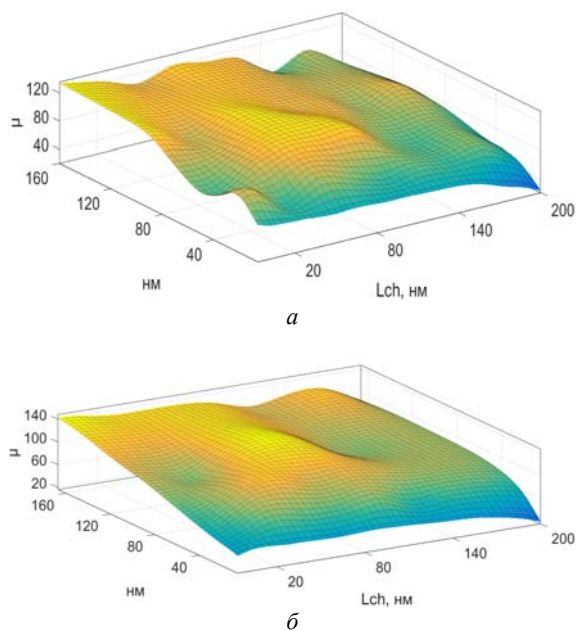


Рисунок 3 – Пространственные распределения подвижности в моделируемых элементах флеш-памяти при $V_D = 2$ В: а – $V_G = 1$ В; б – $V_G = 3$ В

Стоит отдельно отметить, что характерные влияния стокового и затворного напряжения на полученные распределения в рассматриваемых условиях в целом однотипны – с увеличением как стокового напряжения (при постоянном затворном), так и затворного (при постоянном стоковом) наблюдается более существенное уменьшение величины подвижности электронов вдоль проводящего канала (от истока к стоку) МОП-транзистора с плавающим затвором. В целом такое уменьшение величины подвижности происходит и в любом сечении канала в глубину подложки. При сравнительном анализе распределений (рисунок 3) кривые подвижности идут более плавно, нежели в случае изменения стокового напряжения (рисунок 2).

Заключение. Таким образом, в настоящей работе с помощью численного моделирования методом Монте-Карло электронного переноса в кремниевых короткоканальных МОП-транзисторах с плавающим затвором рассчитаны пространственные распределения подвижности электронов по активной области элементов флеш-памяти. Показано, что в исследуемых условиях наибольшая деградация величины подвижности наблюдается вблизи границы раздела у стокового перехода транзистора.

Литература

1. De Salvo B. Silicon Non-Volatile Memories: paths of innovation / B. De Salvo. – London: Wiley-ISTE Ltd, 2009. – 256 p.
2. Fiegna C. Scaling the MOS Transistor Below 0.1 μm : Methodology, Device Structures, and Technology Requirements / C. Fiegna, H. Iwai, T. Wada, M. Saito, E. Sangiorgi, and B. Ricco // IEEE Trans. Electron Dev. – 1994. – Vol. 41, no. 6. – P. 941–951.
3. Govoreanu D. Performance and Reliability of HfAlO_x-based Interpolary Dielectrics for Floating-Gate Flash Memory / D. Govoreanu, D. Wellekens, L. Haspeslagh et al. // Solid-State Electron. – 2008. – Vol. 52. – Iss. 4. – P. 557–563.
4. Борздов В.М. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники / В.М. Борздов, О.Г. Жевняк, Ф.Ф. Комаров, В.О. Галенчик. – Минск: БГУ, 2007. – 175 с.
5. Zhevnyak O. Temperature effect on electron transport in conventional short channel MOSFETs: Monte Carlo simulation / O. Zhevnyak // Proc. SPIE. – 2008. – Vol. 7025. – P. 1M-1–8.
6. Жевняк О.Г. Моделирование паразитных туннельных токов в элементах флеш-памяти на основе короткоканальных кремниевых МОП-транзисторов / О.Г. Жевняк // Eurasian science journal. – 2020. – № 6, Ч. 2. – С. 26–28.

УДК 532.135, 537.622, 546.05

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ НАПОЛНИТЕЛИ ДЛЯ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ МАГНЕТИТА И ЗАМЕЩЕННЫХ ФЕРРИТОВГайдук Ю.С.¹, Моховиков М.А.¹, Шевцова К.А.², Коробко Е.В.², Усенко А.Е.¹, Паньков В.В.¹¹Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь²Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Дисперсные ферромагнитные порошки широко применяются для приготовления магнито-реологических жидкостей (МРЖ), которые помимо ферромагнитных частиц карбонильного железа дополнительно содержат наноразмерные частицы. Их наличие позволяет усилить магнито-реологический отклик МРЖ. Магнитные свойства нанопорошков, которые могут быть компонентами этих жидкотекучих композиций, определяются химическим составом, типом кристаллической решетки, степенью ее дефектности, размером и формой частиц, морфологией, степенью взаимодействия частиц между собой и с окружающей их жидкостью [1].

Методика эксперимента. Были синтезированы образцы с фазовым составом $Mn_{0,3}Fe_{2,7}O_4$ (1), $Co_{0,65}Zn_{0,35}Fe_2O_4$ (2), Mn/Fe_3O_4 (3 – магнетит, легированный оксидом марганца). Образец 1 получен соосаждением водных растворов солей марганца и железа, образец 2 – синтезирован методом распылительной сушки (220 °С) в инертной матрице (NaCl) с последующим отжигом при 740 °С (8ч), образец 3 – получен высокоэнергетическим помолотом обогащенного природного магнетита (Mn/Fe_3O_4). Рентгенографические исследования на дифрактометре ДРОН-3 ($Co_{K\alpha 1}$ -излучение, $\lambda = 0,179026$ нм).

ИК-спектры записывали с помощью спектрометра AVATAR 330 (ThermoNicolet) в области волновых чисел (ν) 400–700 cm^{-1} точностью $\pm 1 cm^{-1}$.

Микроструктуру образцов изучали при помощи сканирующего электронного микроскопа LEO 1420 и просвечивающего электронного микроскопа HitachiH-800 с ускоряющим напряжением 200 кэВ.

Петли гистерезиса при температурах 2, 10, 50, 100 и 300 К при индукции магнитного поля $B_{max} = 8$ Тл были получены в результате исследования магнитных характеристик материалов на установке Cryogen Free Measurement System Cryogenic Ltd. Масса образцов составляла 0,09–0,14 г.

Зависимость напряжения сдвига (τ) суспензий (связующее Mobil 22) от величины магнитной индукции приложенного магнитного поля измеряли на ротационном вискозиметре Physica MCR 301 Anton Paar в режиме постоянной скорости сдвига $\dot{\gamma} = 200 s^{-1}$, при температуре $T = 20$ °С.

Обсуждение результатов. В таблице 1 приведены средние размеры частиц, оцененные

по данным электронной микроскопии, и магнитные характеристики однофазных порошков ферромагнитов (1–3). Размер частиц, удельная намагниченность насыщения M_s и коэрцитивная сила H_c порошкообразных магнитных материалов, зависящие от состава, методики и условий синтеза для данных материалов соответствующим образом литературными данным.

Данные РФА-анализа и ИК-спектроскопии для образцов 1–3 подтверждают формирование шпинельной структуры ферритов (пространственная группа $Fd\bar{3}m$).

Таблица 1 – Размер и магнитные характеристики исследованных образцов

№	Форма частиц	Размер частиц, мкм	M_s , $A \times m^2$, 300 К	H_c , кОе, 300 К
1	смешанная (магнитная, игольчатая, кубическая)	0,1÷50	63	0,18
2	близкая к сферической	~0,05	45	0,4
3	смешанная	0,01÷5	72	0,4

С целью эффективного использования комплекса компонентов в составе МРЖ обычно ставится задача получения частиц наполнителя с наиболее высокой намагниченностью насыщения и небольшим значением коэрцитивной силы. Как правило, такие материалы проявляют наиболее высокие напряжения сдвига в суспензиях при воздействии магнитного поля. Величина же намагниченности насыщения зависит от размера частиц, и для наночастиц имеет меньшие значения, чем для микронных частиц.

Зависимости, представленные на рисунке 1 демонстрируют возрастание напряжения сдвига всех полученных суспензий, содержащих комплексный дисперсный наполнитель, от индукции магнитного поля. В наибольшей степени данный эффект выражен в суспензиях, приготовленных с использованием образцов 2 и 3, поскольку данные материалы обладают одновременно сравнительно большими значениями удельной намагниченности и высокой долей анизотропных по форме частиц в своем составе. Образцы 1 и 2 имеют более однородное распределение частиц по размерам и отличаются несколько меньшими значениями удельной намагниченности.

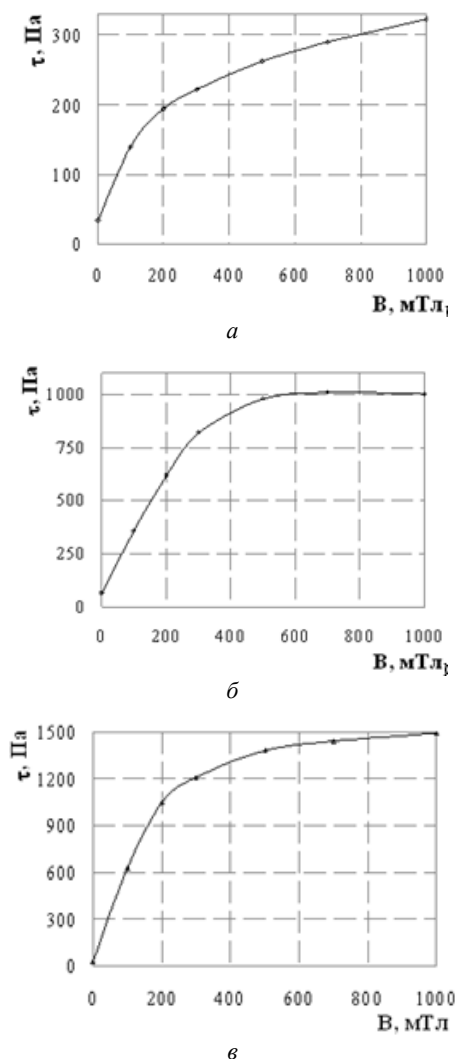


Рисунок 1 – Зависимость напряжения сдвига МРЖ, содержащих 20 мас. % магнитных наночастиц: а – $Mn_{0,3}Fe_{2,7}O_4$ (1); б – $Co_{0,65}Zn_{0,35}Fe_2O_4$ (2); в – Mn/Fe_3O_4 (3) в магнитном поле при скорости сдвига $\gamma = 200 \text{ с}^{-1}$, $T = 20^\circ\text{C}$.

Следует отметить, что образец МРЖ (2), с частицами $Co_{0,65}Zn_{0,35}Fe_2O_4$, при испытаниях в МРЖ обладал заметными остаточными явлениями, который видны на его гистерезисных кривых намагниченности в отличии от частиц легированного магнетита, что уменьшает возможность его применения в динамических системах.

Интересно отметить также, что τ/τ_0 для образца 3 близко к соответствующему значению для суспензии, приготовленной на основе игольчатого магнетита, обладающего наиболее высоким значением намагниченности среди всех исследованных ранее образцов [2]. При этом значение намагниченности образца 3 составляет $M = 80 \text{ A}\cdot\text{m}^2$ (для игольчатого магнетита составляет $M = 112 \text{ A}\cdot\text{m}^2$ [2]). Образец 3 характеризуется незначительной коэрцитивной силой ($\sim 0,4 \text{ кОе}$), которая выражается в наличии остаточной намагниченности после выключения магнитного поля.

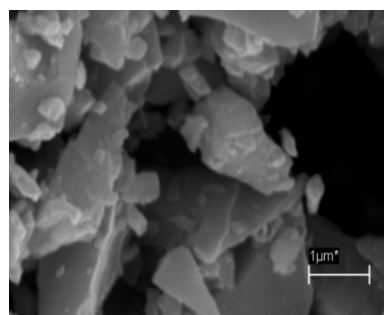


Рисунок 2 – СЭМ-изображение образцов порошка Mn/Fe_3O_4 (образец 3)

Выводы. Высокое значение напряжения сдвига (1кПа и выше) при сравнительно невысокой индукции магнитного поля (от 600 мТл) позволяет считать магнетит, легированный ионами марганца (образец 3) наиболее перспективным материалом для использования в качестве дополнительного функционального наполнителя магнитореологических суспензий, в частности, для создания эффективных демпфирующих жидкостей.

Литература

1. Коробко Е.В., Паньков В.В., Котиков Д.А., Новикова З.А., Новик Е.С. Наноструктуры в конденсированных средах: сборник научных статей. – Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 20 – 23 августа 2018 г.
2. D. Kotsikau, A. Eroma, E. Korobko, Z. Novikova, V. Natarov, V. Pankov. Magnetite rod-like particles doped with Zn as an additive for magnetorheological fluids based on carbonyl iron // Proc. EMRS 2017 Fall Meet., Warsaw, Poland, Sept 18–21, 2017, Z20WB.

УДК. 669.6-8

СТАБИЛЬНОСТЬ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Sn-Zn ПРИ ОТЖИГЕ

Зерница Д.А.¹, Шепелевич В.Г.²¹Мозырский государственный университет имени И.П. Шамякина

Мозырь, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет

Минск, Республика Беларусь

Оловянно-цинковые сплавы находят широкое применение в промышленности: машиностроении, металлургии, приборостроении, и т.д. Особый интерес к ним был вызван в связи с ограничением свинца из-за его высокой токсичности. В последние десятилетия активно развиваются ресурсо- и энергосберегающие технологии, к которым относится высокоскоростное затвердевание, приводящее к формированию структур, которые невозможно получить с помощью традиционных технологий синтеза. При высокоскоростной кристаллизации возможно измельчение структурных составляющих, формирование текстуры и образование неравновесных фаз [1, 2].

Быстрозатвердевшие сплавы могут быть получены в виде тонких фольг толщиной не более 100 микрон, что позволяет расширить область применения припоев, автоматизировать процесс пайки изделий. В связи с этим в настоящей работе представлены результаты исследования стабильности быстрозатвердевших фольг сплавов Zn-x мас. % Sn (x=10; 20) при выдержке в нормальных условиях, а также при проведении изохронного отжига.

Фольги исследуемых сплавов, содержащих 10 и 20 мас. % Sn, получены путём инжектирования капли расплава на внутреннюю поверхность кристаллизатора, вращающегося с частотой 25 об/с (скорость охлаждения была не менее $5 \cdot 10^5$ K/c) [3]. Толщина фольг была в пределах 50–90 мкм. Исследование микроструктуры проводилось с помощью растрового электронного микроскопа LEO 1455 VP, имеющего приставки для проведения рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) и фазового анализа HKL EBSD Premium System Channel 5. Исследование текстуры фольг проводилось с помощью рентгенографического анализа (дифрактометр Rigaku Ultima IV с медным анодом). Для записи дифрактограммы исследуемые образцы подвергались съёмке со скоростью 2 °/мин. Параметр кристаллической решётки *c* цинка определялся по положению дифракционной линии 0004 ($2\theta \approx 77^\circ$). Микротвёрдость измерялась с помощью прибора ПМТ-3 с нагрузкой 20 г и временем индентирования 20 г (относительная погрешность измерения составляла не более 4 %). Изохронный отжиг исследуемых фольг проводился от комнатной температуры до температуры плавления с интерва-

лом 20 °C и выдержкой 20 мин для каждой температуры.

Проведённые исследования показали, что в исследуемых сплавах наблюдалась микрокристаллическая структура и чётко выраженная текстура (0001) цинка и (100) олова (рисунок 1, 2), что наблюдалось ранее в фольгах чистых компонентов [4]. Образование наблюдаемых текстур олова и цинка в фольге обуславливается преимущественным ростом кристаллитов, у которых плотноупакованные плоскости (100) Sn и (0001) Zn перпендикулярны направлению теплоотвода.

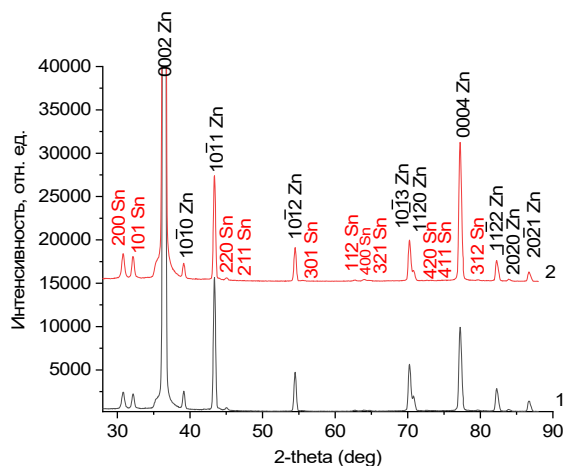


Рисунок 1 – Рентгенограммы быстрозатвердевших сплавов: 1 – Zn-10 мас. % Sn; 2 – Zn-20 мас. % Sn

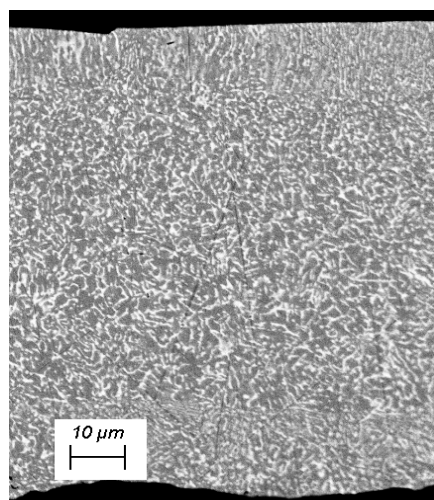


Рисунок 2 – Поперечное сечение фольги сплава Zn-20 мас. % Sn

Средняя хорда на сечениях олова d_{Sn} для фольги с содержанием цинка 80 мас. % равна 0,47 мкм, тогда как для фольги Sn-90 мас. % Zn она равна 0,55 мкм. Удельная поверхность межфазных границ $S_{МФГ}$ для первого сплава составляет 2,50 мкм⁻¹, а для сплава Sn-90 мас. % Zn – 1,23 мкм⁻¹. Образование дисперсных однородно распределённых частиц олова обусловлено значительным переохлаждением жидкой фазы, которая при этом пересыщена обоими компонентами [5].

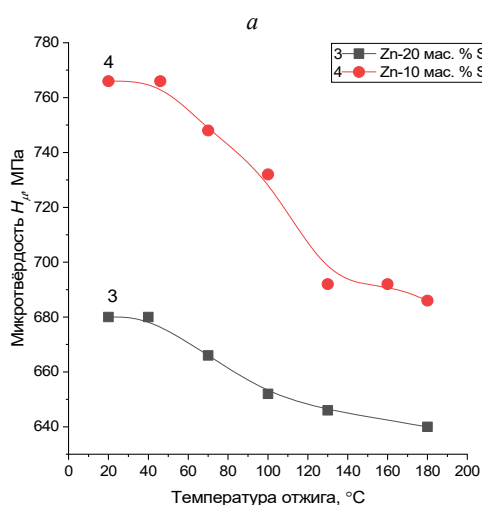
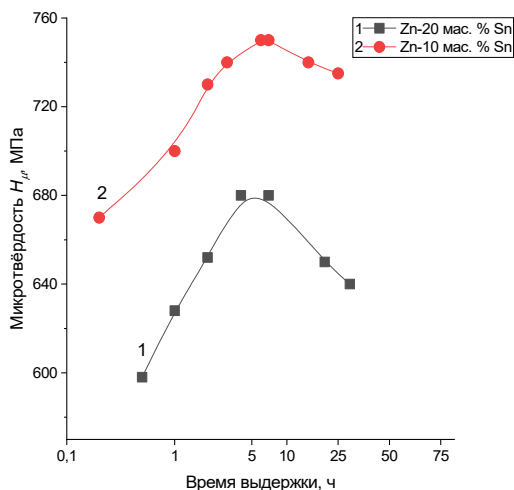


Рисунок 3 – Изменение микротвёрдости фольг сплавов системы Sn-Zn при: а – выдержке при комнатной температуре; б – при изохронном отжиге

Быстрозатвердевшие фольги с целью исследования стабильности были подвергнуты выдержке при комнатной температуре (рисунок 3, а). Кривые изменения микротвёрдости H_{μ} при комнатной температуре показывают линейный характер увеличения микротвёрдости в течение первых 10 часов после получения фольг, что связано с активным протеканием диффузионных процессов в исследуемых быстрозатвердевших сплавах. Вследствие высоких скоростей охлаждения при затвердевании из жидкого расплава про-

исходит захват легирующих элементов, и образуется пересыщенный твёрдый раствор, который вследствие низких $T_{плавл}$ исследуемых сплавов вызывает протекание процесса диффузии в структуре фольг, что способствует распаду пересыщенных твёрдых растворов. Увеличение микротвёрдости при комнатной температуре вызвано распадом пересыщенного твёрдого раствора, при котором из твёрдого раствора цинка выделяются дисперсные частицы олова. Дальнейшее их объединение препятствует движению дислокаций, и приводит к снижению микротвёрдости [6].

Для изучения влияния высоких температур на поведение быстрозатвердевших фольг проводился изохронный отжиг. Отжиг фольг при 160 °C в течение 90 минут вызывает увеличение средней хорды на сечениях олова d_{Sn} , а удельная поверхность межфазных границ уменьшается. Изохронный отжиг фольг (рисунок 3, б) до 50 °C практически не оказывает влияния на микротвёрдость. При нагреве вышеуказанных температур до 180 °C происходит уменьшение микротвёрдости, что связано с продолжающимся процессом коалесценции частиц олова, который начался при комнатной температуре после 10 часов выдержки.

Таким образом, быстрозатвердевшие сплавы на основе цинка Zn-х мас. % Sn ($x = 10; 20$) имеют микрокристаллическую структуру, в которой наблюдается текстура (0001) цинка и (100) олова. При комнатной температуре микротвёрдость изменяется. Нестабильность быстрозатвердевших фольг вызвана образованием пересыщенного твёрдого раствора. Его распад способствует увеличению доли дисперсных частиц олова, которые с течением времени образуют сегрегации из более крупных выделений олова, а дисперсные включения переходят в твёрдый раствор цинка после завершения этапа активного распада. Отжиг способствует более активному протеканию процесса коалесценции, и микротвёрдость уменьшается.

Литература

1. Шепелевич В.Г. Быстрозатвердевшие легкоплавкие сплавы. – Минск: БГУ, 2015. – 192 с.
2. Suganuma K., Kim K. S. Sn-Zn low temperature solder // J Mater Sci: Mater Electron. – 2007. – № 18. – P. 121–127.
3. Мирошниченко И.С. Закалка из жидкого состояния. – М.: Металлургия, 1982. – 168 с.
4. Shepelevich V.G. Structure and properties of rapidly solidified Sn-Zn foils / V.G. Shepelevich, O.V. Gusakova // Inorganic Materials. – 2008. – V. 44. – I. 5. – P. 485–489.
5. Соколовская Е.М. Металлохимия / Е.М. Соколовская, Л.С. Гузей. – Москва: Изд-во МГУ, 1986. – 263 с.
6. Miyazawa Y., Ariga T. Influences of Aging Treatment on Microstructure and Hardness of Sn-(Ag, Bi, Zn) Eutectic Solder Alloys // Materials transactions 42(5). – P. 776–782.

ЗАДАЧА О ДИССИПАТИВНОМ УРАВНЕНИИ ДВИЖЕНИЯ ТЕОРИИ ϕ^4 С НАРУШЕНИЕМ ЛОРЕНЦ-ИНВАРИАНТНОСТИ

Князев М.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Требование инвариантности уравнений движения в теории поля относительно преобразований Лоренца является общим в современной физике. Это в полной мере относится и к теории ϕ^4 , одной из наиболее широко распространенных теорий, используемой в различных областях исследований: классической и квантовой теории поля, физике элементарных частиц, теории фазовых переходов в конденсированных средах, физике магнитных явлений, инфляционной теории, описания формирования топологических дефектов в космологии и многих других [1].

В последние годы появился ряд работ, в которых рассматриваются процессы, протекающие с нарушением инвариантности относительно преобразований Лоренца. К таким процессам относятся электродинамика Максвелла при учете взаимодействия Черн-Симона, учет членов, нарушающих Лоренц-инвариантность в низкоэнергетическом пределе в стандартной модели и высокоэнергетическом пределе в моделях теории струн, некоммутативная теория поля, процессы в суперсимметричных теориях, протекающие с нарушением инвариантности относительно преобразований Лоренца, возможные ограничения инвариантности Лоренца, которые следуют из радиоастрономических наблюдений и т.д. В скалярных моделях теории поля, в том числе и многокомпонентных, уравнение движения имеет, как правило, решение в виде кинка или кинкоподобного объекта. Такие решения находят применение при исследовании эффекта Кондо, захвата фермионов, а также в задачах об энтропии информационных процессов. Достаточно полный обзор современного состояния вопроса можно найти в работе [2] (см. также работу [3]).

В настоящей работе рассматриваются (1+1)-мерные уравнения движения скалярной теории ϕ^4 , поскольку она является достаточно простой и, как следствие, достаточно подробно изученной. Для простоты и удобства всюду, где это можно, коэффициенты будут считаться равными единице.

Уравнение движения теории ϕ^4 в статическом случае имеет вид [4]

$$\phi_{xx} + \phi - \phi^3 = 0. \quad (1)$$

Решение этого уравнения хорошо известно. Его можно записать следующим образом

$$\phi_{ст}(x) = \pm \tanh\left(\frac{x-x_0}{\sqrt{2}}\right). \quad (2)$$

Здесь знак плюс соответствует решению в виде кинка, а знак минус – решению в виде анти-

кинка. x_0 представляет собой начальную фазу и определяет координату центра кинка.

В динамическом случае уравнение движения теории ϕ^4 записывается следующим образом

$$\phi_{tt} - \phi_{xx} - \phi + \phi^3 = 0. \quad (3)$$

Уравнение (3) относится к неинтегрируемым нелинейным уравнениям в частных производных. Это означает, что для него существует только одно решение в виде одиночного кинка (или антикинка) и не существует решений, соответствующих связанным состояниям произвольного (даже малого) числа кинков и/или антикинков [5, 6]. Это решение можно записать сразу, используя его инвариантность относительно преобразований Лоренца. Для этого достаточно применить преобразование Лоренца к решению (2). В результате получим:

$$\phi(x, t) = \pm \tanh\left(\frac{x-x_0-ut}{\sqrt{2(1-u^2)}}\right), \quad (4)$$

где $-1 < u < 1$ – скорость движения кинка.

Учет процессов диссипации в теории ϕ^4 приводит к следующей форме уравнения движения:

$$\phi_{tt} - \phi_{xx} + \alpha\phi_t - \phi + \phi^3 = 0, \quad (5)$$

где α – коэффициент затухания. Данное уравнение по-прежнему является инвариантным относительно преобразований Лоренца. Его решение можно получить, используя эллиптические функции [7] или метод Хироты решения нелинейных уравнений в частных производных [1]. Оно записывается в следующем виде:

$$\phi(x, t) = \frac{1}{2}\{1 - \tanh[\alpha(x - ut) + x_0]\}. \quad (6)$$

Решение (6) уже не является кинком в общепринятом понимании этого термина. Более правильно назвать его кинкоподобным. Несмотря на учет по сравнению с уравнением (3) в уравнении (5) дополнительного описывающего потери энергии слагаемого, для этого уравнения также не удастся построить решения, соответствующие связанным состояниям не только произвольного числа кинкоподобных объектов, но даже и в том случае, когда рассматриваются только два таких объекта. Следовательно, уравнение (5) также является неинтегрируемым.

Уравнение движения теории ϕ^4 , которое не является инвариантным относительно преобразований Лоренца, имеет вид [2]:

$$\phi_{tt} - \phi_{xx} + 2\beta\phi_{xt} - \phi + \phi^3 = 0. \quad (7)$$

Нарушение Лоренц-инвариантности описывается параметром β , который принимает неотрицательные значения. Случай $\beta = 0$ представляется тривиальным. Коэффициент 2 введен из соображений удобства вычислений. Видно, что слагаемое, нарушающее Лоренц-инвариантность, не влияет на уравнение в статическом случае. В работе [3] показано, что уравнение (7) инвариантно относительно преобразования:

$$x' = \gamma(x - ut), \quad (8)$$

где $\gamma = 1/\sqrt{1 - u^2 + 2\beta u}$. Несмотря на нарушение Лоренц-инвариантности, зависящее от времени топологически нетривиальное решение уравнения (7) имеет вид

$$\phi(x, t) = \pm \tanh[\gamma(x - ut - x_0)]. \quad (9)$$

Все обозначения, использованные в данной формуле, разъяснены выше. Положительное значение скорости соответствует движению кинка/антикинка вправо, а отрицательное – влево.

Проблема существования для уравнения (7) решений, которые описывали бы решения, соответствующие связанным состояниям отдельных кинков типа (9), в настоящее время остается открытой. Окончательный вывод о том, является ли уравнение (7) интегрируемым или нет, пока сделать не удастся.

Уравнения (3), (5) и (7) обладают очевидной симметрией. Их формы записи достаточно схожи. Отличие между ними состоит в наличии различных слагаемых, но поскольку эти слагаемые являются линейными по неизвестной функции (её производных), то их вклад не должен оказывать существенное влияние на свойства нелинейного уравнения и характер его решения. Это и проявляется в записи решений всех трех указанных уравнений. Все они определяются функцией гиперболического тангенса, приводя к решению, которое является или кинком или кинкоподобным объектом. Несмотря на то, что вопрос об интегрируемости уравнения (7) остается открытым, из соображений общего характера, основывающихся на симметрии, можно сделать предположение, что это уравнение также будет относиться к неинтегрируемым.

Дальнейшее развитие исследований в этом направлении может заключаться в обобщении уравнения движения теории ϕ^4 . Все рассмотренные выше уравнения движения в теории ϕ^4 содержат один и тот же потенциал. Поэтому одним из путей модификации может являться изменение вида потенциала. Однако более значительный интерес представляет такая модификация этого уравнения, в которой при сохранении вида потенциала одновременно учитываются и процессы диссипации, и нарушение инвариантности относительно преобразований Лоренца. Такое уравнение можно записать следующим образом:

$$\phi_{tt} - \phi_{xx} + \alpha\phi_t + 2\beta\phi_{xt} - \phi + \phi^3 = 0. \quad (10)$$

Аналитическое решение данного уравнения в явной форме до настоящего времени еще не построено, хотя из сравнения этого уравнения с уравнениями, приведенными выше, из соображений симметрии, очевидно, что оно также должно некоторым образом выражаться через функцию гиперболического тангенса, а значит будет либо кинком, либо кинкоподобным объектом. Как следствие, не доказанным строго остается вопрос и об интегрируемости этого уравнения, поскольку построение решений, соответствующих связанным состояниям остается открытым.

Литература

1. Князев М.А. Кинки в скалярной модели с затуханием / М.А. Князев. – Минск: Тэхналогія, 2003. – 115 с.
2. Haobo Yan. Kink-antikink collision in a Lorentz-violating model / Haobo Yan, Yuan Zhong, Yu-Xiao Liu and Kei-ichi Maeda // Phys. Lett. B. – 2020. – V. 807. – P. 135542.
3. Barreto M.N. Defect structures in Lorentz and CPT violating scenarios / M.N. Barreto, D. Bazeia and R. Menezes // <http://xxx.lanl.gov> (arXiv:hep-th/0506262).
4. Раджараман, Р. Солитоны и инстантоны в квантовой теории поля / Р. Раджараман. – Москва: Мир, 1985. – 416 с.
5. Ньюэлл А. Солитоны в математике и физике / А. Ньюэлл. – Москва: Мир, 1989. – 326 с.
6. Абловиц, М. Солитоны и метод обратной задачи / Москва: Мир, 1987. – 479 с.
7. Cervero, J.M. General elliptic solution for the cubic equation with damping / J.M. Cervero and P.G. Estevez // Phys. Lett. A. – 1986. – V. 114, Ns 8–9. – P. 435–436.

УДК 621.372.82

ТЕРАГЕРЦОВЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ВОЛНОВОД С ВНЕШНИМ СЛОЕМ ГРАФЕНАЗезюля П.А.¹, Гацкевич Е.И.², Малевич В.Л.^{3,4}, Синицын Г.В.⁴¹Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь³Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь⁴Институт физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Как известно, вдоль границы металлического провода может распространяться цилиндрическая поверхностная электромагнитная волна ТМ типа (поверхностный плазмон-поляритон (ПП)), амплитуда поля которой экспоненциально уменьшается при удалении от поверхности проводника. С уменьшением частоты коэффициент затухания ПП падает и в области ТГц частот длина пробега ТГц ПП может составлять несколько десятков сантиметров и достигать метра на субтерагерцовых частотах [1, 2]. Слабое затухание ТГц ПП обусловлено малой глубиной проникновения ТГц поля в металл, что приводит к преимущественной локализации его в диэлектрике, окружающем проводник. Было показано, что такие волноводы обладают незначительной дисперсией групповой скорости и могут передавать широкополосные ТГц импульсы без существенных искажений. Одним из недостатков этих волноводов является малая степень локализации электромагнитного поля. Экспериментально было показано [2], что ТГц поле проникает за пределы проводника на расстояния порядка нескольких сантиметров.

Вдоль поверхности графенового монослоя также могут распространяться локализованные поверхностные электромагнитные волны, причем, как ТМ, так и ТЕ типов поляризаций [3]. Эти поверхностные моды могут перекрываться и взаимодействовать с поверхностными плазмон-поляритонами, распространяющимися вдоль границы металла. Весьма существенно, что дисперсией и затуханием поверхностных мод можно управлять, изменяя его проводимость путем подачи напряжения.

В данной работе проанализированы особенности распространения поверхностных ТГц волн ТМ поляризации в коаксиальной волноводной структуре, состоящей из центрального проводника, выполненного из металла или полупроводника, промежуточного слоя диэлектрика и нанесенного на его внешнюю поверхность монослоя графена.

Дисперсионное уравнение, описывающее распространение ТМ волну в рассматриваемой структуре имеет вид [4]:

$$\left[1 + \frac{\varepsilon_m k I_1(k_m a) K_0(ka)}{\varepsilon k_m I_0(k_m a) K_1(ka)} \right] \left[\frac{\varepsilon I_1(kb)}{k I_0(kb)} + \frac{1}{q} \frac{K_1(qb)}{K_0(qb)} + i \frac{4\pi\sigma_g}{\omega} \right] = \frac{I_1(ka) K_0(kb)}{K_1(ka) I_0(kb)} \times \left[1 - \frac{\varepsilon_m k I_1(k_m a) I_0(ka)}{\varepsilon k_m I_0(k_m a) I_1(ka)} \right] \times \left[\frac{\varepsilon K_1(kb)}{k K_0(kb)} - \frac{1}{q} \frac{K_1(qb)}{K_0(qb)} - i \frac{4\pi\sigma_g}{\omega} \right], \quad (1)$$

где a и b – радиусы провода и цилиндрического графенового слоя, σ_g – поверхностная проводимость графена, ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика, использовалось друде-лорентцевское выражение для диэлектрической проницаемости металла $\varepsilon_m(\omega) = 1 - \omega_p^2 / (\omega^2 - i\omega\gamma)$ (ω_p – плазменная частота, γ – время релаксации электронов по импульсу), $q = (\beta^2 - \omega^2/c^2)^{1/2}$, $k = (\beta^2 - \varepsilon\omega^2/c^2)^{1/2}$,

$k_m = (\beta^2 - \varepsilon_m \omega^2/c^2)^{1/2}$, ω и β – частота и постоянная распространения волны, $I_n(x)$ и $K_n(x)$ – модифицированные функции Бесселя.

В рассматриваемом ТГц диапазоне частот можно ограничиться внутризонным (друдевским) вкладом [5] в проводимость графена

$$\sigma_g(\omega) = i \frac{2e^2 kT}{\pi \hbar^2 (\omega - i\gamma_g)} \ln \left(2 \cosh \left(\frac{\varepsilon_F}{2kT} \right) \right),$$

Где ε_F и γ_g – энергия Ферми и частота столкновений электронов в графене.

На рисунке 1 приведены частотные зависимости действительной и мнимой частей постоянных распространения для двух мод, распространяющихся в волноводе. Для диэлектрической проницаемости материала сердцевины волновода брались следующие значения параметров: $\gamma = 1,6 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$, $\omega_p = 4 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$. Видно, что мода, соответствующая красным линиям, является слабо затухающей. Электрическое поле этой моды в основном локализовано за пределами волновода, что и обуславливает ее слабое поглощение. Большое затухание второй моды (черные линии)

обусловлено друдевским поглощением в проводе и графене, поскольку ее поле локализовано внутри волновода.

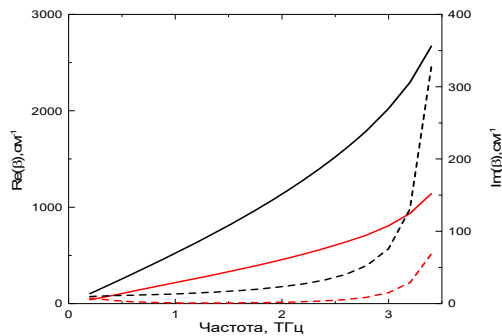


Рисунок 1 – Действительная (сплошные линии) и мнимая части (штриховые линии) постоянной распространения двух мод, рассчитанные для $\varepsilon_F=0,65$ эВ, $a=100$ мкм, $b=150$ мкм, $\gamma_g=10^{12}$ с $^{-1}$

Дисперсионные кривые поверхностных мод коаксиального волновода рассчитывались для $\varepsilon=2$ и разных значений параметров ε_F , a , b (рисунок 2).

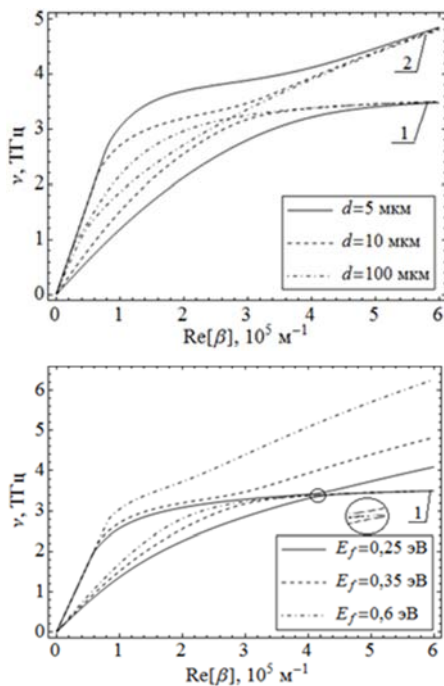


Рисунок 2 – Зависимости частоты поверхностных мод от постоянной распространения: верхний рисунок – для различных значений параметра: $d = b - a$ ($\varepsilon_F = 0,35$ эВ, $a = 15$ мкм); нижний рисунок – для различных ε_F ($a = 15$ мкм, $b = 25$ мкм)

Из расчетов следует, что при большой величине зазора $d = 100$ мкм между слоем графена и поверхностью проводника дисперсионные кривые пересекаются при частоте 3,3 ТГц. При уменьшении расстояния между проводом и графеном моды начинают взаимодействовать, что приводит к снятию вырождения или эффекту «отталкивания мод». Перестройка спектра мод из-за эффекта взаимодействия усиливается при уменьшении величины зазора d . С уменьшением значения уровня Ферми наблюдается уменьшение эффекта «отталкивания мод». Такое поведение связано с тем, что уменьшение концентрации носителей тока в графене приводит к более сильной локализации поля вблизи его поверхности и, соответственно, к более слабому перекрытию полей поверхностных плазмон-поляритонов, распространяющихся в проводнике и графене. Исследовалось также влияние радиуса провода на дисперсию волновода. В частности, были проведены расчеты для различных значений радиусов a и b при постоянном значении зазора $d = 10$ мкм. Расчеты показывают, что с уменьшением радиуса провода a эффект «отталкивания мод» возрастает.

Таким образом, в ТГц области частот в коаксиальном волноводе с графеновой оболочкой существуют две моды ТМ типа, одна из которых является слабо затухающей. Постоянные распространения и коэффициенты затухания обеих мод зависят от энергии Ферми графена. Изменяя уровень Ферми путем подачи электрического смещения, можно управлять передаточными характеристиками волновода с графеновой оболочкой.

Литература

1. Wang K., Mittleman D.M. Metal wires for terahertz waveguiding. Nature, 2004, vol. 432, pp. 376–379.
2. THz Sommerfeld wave propagation on a single metal wire/ T.-In Jeon, J. Zhang, D. Grischkowsky. Appl. Phys. Lett., 2005, vol. 86, p. 161904.
3. Graphene photonics and optoelectronic / Bonaccorso F. [et al.] // Nat. Photonics. – 2010. – Vol. 4. – P. 611–622.
4. Коаксиальный терагерцовый волновод с внешним слоем графена / П.А. Зезюля, В.Л. Малевич, Г.В. Сеницын // Материалы «12-ой Международной научно-технической конференции по квантовой электронике», 18–22 ноября 2019 г., г. Минск. – 2019. – С. 13–15.
5. Falkovsky L.A. Optical properties of graphene // J. of Physics: Conference Series. – 2008. – Vol. 129. – № 1. – P. 012004-1-012004-7.

УДК 53

ЗАВИСИМОСТЬ НЕКОТОРЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВИРОВАННЫХ СТЕКОЛ ОТ ЭФФЕКТИВНОЙ СИЛЫ ИЗ ХИМИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ

Прусова И.В.¹, Прихач Н.К.¹, Сергеев И.И.²¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Исследовались активированные ионами Nd³⁺ стекла, полученные путём плавления соосажденной шихты [1]. На рисунке 1 изображен спектр поглощения такого стекла с концентрацией $N_{Nd} = 68 \cdot 10^{20}$ ионов/см³. Значения плотности (ρ), показателя преломления (n_d), параметров, характеризующих их спектральные полосы (СП), а также положение высокочастотной границы фонового спектра $\nu_{ик}$ при $k = 500$ см⁻¹. При этом корреляция в направлении и величине изменений имеет место лишь для ν , $\bar{\nu}$ и $\Delta\nu$.

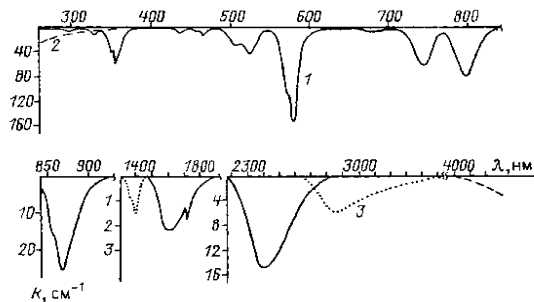


Рисунок 1 – Спектр поглощения образца 10:
1 – поглощение ионов Nd³⁺; 2 – собственное поглощение стекла; 3 – поглощение, обусловленное ОН-группами

Корреляция в изменении значений $\nu_{ик}$ – коротковолновой границы фонового спектра стекла, $\bar{\nu}$ – положение барицентра полосы $^4I_{9/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$ ионов Nd³⁺, $\Delta\nu(^4F_{3/2})$ – расщепления состояния $^4F_{3/2}$ ионов Nd³⁺ – может указывать на общность вызывающей ее причины. Учитывая невозможность использования единой системы локальных координат для ОЦ стекла, а также тот факт, что положение фонового спектра в значительной мере определяется силами связей между элементами структурного каркаса [2], представляется целесообразным связать эти характеристики с некоторой интегральной для стекла силой химических связей. Подобные попытки уже предпринимались для прогноза физико-химических свойств стекол на основе расчета средней силы мостиковых связей [3], которая для исследованного бесщелочного стекла имеет вид:

$$F_c = \frac{\sum_{\bar{e}} N_{\bar{e}} z_{\bar{e}} (F_{\bar{a}})_{\bar{e}}}{\sum_{\bar{e}} N_{\bar{e}} z_{\bar{e}}}, \quad (1)$$

где $N_{\bar{e}}$ – объемная концентрация катионов; $z_{\bar{e}}$ – количество химических связей катион-анион;

F_c – относительная сила единичной валентной связи. Корректируя F_c с учетом ослабления связей при увеличении радиусов взаимодействующих ионов, введем новый параметр, который назовем эффективной относительной силой химических связей структурного каркаса:

$$\bar{F} = F_c / [1 + \frac{4\pi}{3} \sum_{\bar{e}, \bar{a}} (r_{\bar{e}}^3 N_{\bar{e}} + r_{\bar{a}}^3 N_{\bar{a}})]. \quad (2)$$

Здесь индекс «а» относится к анионам.

Хотя точное определение некоторых величин, входящих в выражения (1) и (2), проблематично, их значения вполне поддаются оценке. Так, F_c можно вычислить, зная лишь мольные доли входящих в стекло оксидов, в чем легко убедиться, подставив в формулу (1) выражение для N из формулы (3), а z_k можно считать равным КЧ катионов, достаточно корректные значения которых определяются на основе геометрического критерия [4].

$$N = 0,001 N_A \rho C n_x / M, \quad (3)$$

где N_A – число Авогадро, ρ – плотность стекла, n_x и M – количество искомым элементов в окисле и его молярная масса соответственно.

Несложный расчет показывает, что наиболее вероятные значения КЧ для катионов Si⁴⁺, Al³⁺, Ln³⁺ в оксидах равны 4, 6, 8 соответственно. Что касается величины F_c , то, принимая прочность чисто ионной связи за 1, а прочность наиболее распространенной среди минералов ковалентной связи за 2, ее можно вычислить прибавлением к единице степени ковалентности связи, определенной по разности электроотрицательностей, например, с помощью таблицы, приведенной в [5], и выраженной в долях единицы. С учетом гибридизации орбиталей можно считать полученные значения одинаковыми для всех связей данного катиона.

На рисунках 2 и 3 изображены зависимости $\nu_{ик}$ стекла и $\bar{\nu}(^4I_{9/2} \rightarrow ^2P_{1/2})$, $\Delta\nu(^4F_{3/2})$ ионов Nd³⁺ от введенного параметра. При вычислении \bar{F} использовались «рентгенографические» значения r_n [2], а количество химических связей, приходящихся на один катион, полагалось равным его КЧ и определялось на основе геометрического критерия. Как видно, полученные зависимости в пределах ошибки эксперимента можно аппроксимировать линейными функциями. Смещение

$\nu_{\text{ИК}}$ в высокочастотную сторону с увеличением \bar{F} находится в согласии с известным фактом коротковолнового сдвига колебательных полос вещества с усилением химических связей между его элементами при сохранении их массы. Однако если бы при этом происходило уменьшение расстояния между всеми элементами, входящими в стекло, следовало бы ожидать длинноволнового смещения $\bar{\nu}(^4I_{9/2} \rightarrow ^2P_{1/2})$ из-за расширения электронных орбиталей активатора в результате увеличения его взаимодействия с атомами кислорода. Наблюдаемое же в эксперименте коротковолновое смещение свидетельствует об уменьшении степени ковалентности связи активатора с его ближайшим окружением. Полагая, что коэффициент делокализации орбиталей металла, окруженного лигандной оболочкой из одинаковых химических элементов, определяется выражением [7] $\Psi \cong \text{Const} \cdot S_R(N_0)^{1/2}$, где S_R – радиальная часть интеграла перекрывания орбиталей лигандов и центрального атома, а N_0 – количество взаимодействующих с ним орбиталей лигандов, можно высказать некоторые соображения относительно структурной реорганизации окружения активатора при увеличении \bar{F} . По-видимому, уменьшение степени ковалентности связи неодим – лиганды в результате понижения КЧ активатора (уменьшения N_0) для исследованных бесщелочных стекол не имеет места, поскольку при их синтезе имеются физические предпосылки лишь для увеличения его КЧ за счет уменьшения КЧ алюминия.

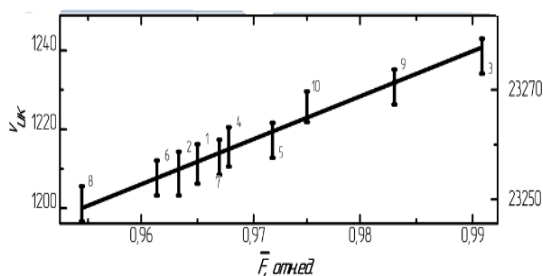


Рисунок 2 – Зависимость коротковолновой границы фонового спектра стекла от эффективной силы химических связей

Поэтому можно полагать, что в данном случае имеет место уменьшение радиальной части интеграла перекрывания, которое вызывается увеличением расстояний Nd – O из-за смещения кислорода от неодима к более электроотрицательным элементам в соответствии с известным правилом «поляризации и контрполяризации» [6].

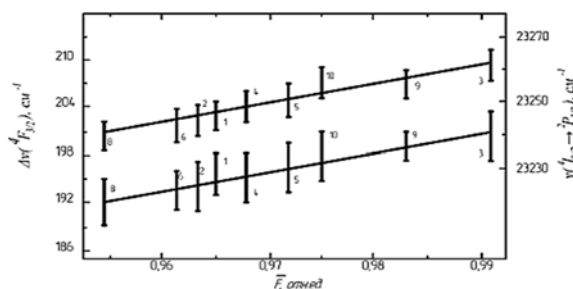


Рисунок 3 – Зависимость величины расщепления состояния $^4F_{3/2}$ ионов Nd^{3+} (нижняя прямая), положения баристра полосы $^4I_{9/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$ (верхняя прямая)

Наблюдаемое при уменьшении степени ковалентности связи неодим – лиганды понижение симметрии ОЦ, о чем свидетельствует усиление расщепления термина $^4F_{3/2}$, можно объяснить тем, что с ростом \bar{F} , т.е. с увеличением в стекле доли элементов с большими значениями F_e , z_e и меньшими ионными радиусами (см. формулы (1) и (2)), условия для активного формирования в расплаве неодимом своей лигандной оболочки ухудшаются и ее конфигурация в значительной мере определяется поляризующим влиянием этих элементов.

Авторы благодарят Георгия Ефимовича Малашкевича за любезно предоставленные для измерения стекла.

Литература

1. Малашкевич Г.Е., Тадэуш В.Н., Кузнецова В.В., Черчес Х.А., Близнюк Н.И., Михалевич В.Г., Ржевский М.Б. Физико-химические и спектрально-люминесцентные свойства стекла системы $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Nd}_2\text{O}_3$ // ЖПС. – 1982. – Т. 37, № 2. – С. 261–265.
2. Брандмюллер И., Мозер Г. Введение в спектроскопию комбинационного рассеяния. – М.: Мир, 1964. – 628с.
3. Ермоленко Н.Н. О зависимости некоторых физических свойств стекол от их химического состава и структуры. В сб.: Стекло, ситаллы и силикатные материалы. – Минск: Вышэйшая школа, 1976. – Вып. 5. – С. 3–9.
4. Вайнштейн Б.К., Фридкин В.М., Инденбом В.Л. Современная кристаллография. – М.: Наука, 1982. – Т. 2. – 354 с.
5. Поваренных А.С. Твердость минералов. Киев: Изд. АН УССР, 1963. – С. 51–65.
6. Аппен А.А. Химия стекла. – Л.: Химия, 1974. – 352 с.
7. Давиденко Н.К., Яцимирский К.Б. Закономерности смещения полос в спектрах ионов лантаноидов при комплексообразовании в растворах // Теор. и эксп. химия. – 1970. – Т. 6. – С. 620–628.

СТАНДАРТНЫЙ И СИНГУЛЯРНЫЙ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ

Романчак В.М., Гундина М.А.

*Белорусский национальный технический университет**Минск, Республика Беларусь*

Анализ сигнала производят путем разложение исходного сигнала на более простые составляющие. Так сигнал выражают в виде суммы синусоид. Каждая синусоида характеризуется частотой, фазой, амплитудой. Достоинством такого разложения является возможность придать физический и геометрический смысл полученным результатам. Например, нота в музыке является синусоидой с определённой частотой и амплитудой. Синусоиду можно изобразить графически.

В настоящее время популярной темой многих научных и инженерных исследований стали вейвлеты. Известно, что вейвлет – это класс особых функций, определенных с точностью до масштаба и сдвига. Одно из первых упоминание о вейвлетах появилось в литературе по цифровой обработке и анализу сейсмических сигналов в работах А. Гроссмана и Ж. Морле. Такие вейвлеты напоминают по форме затухающую синусоиду и в данной работе называются стандартными. Вейвлет-преобразование разбивает множество данных на составляющие с разными масштабами и сдвигами. При этом теряется возможность простой интерпретации полученных результатов.

Сингулярные вейвлеты впервые рассматривались в работах [1–3]. Сингулярные вейвлеты по форме напоминают дельта-образную функцию. С помощью сингулярных вейвлетов может быть решена задача сглаживания экспериментальных данных. Целью работы является изучение возможности фильтрации сигнала с помощью сингулярных вейвлетов. С физической точки зрения цифровая фильтрация – это выделение в определенном частотном диапазоне с помощью цифровых методов полезного сигнала на фоне мешающих помех. В работе сформулировано предположение, что при анализе стационарного сигнала применение классических вейвлетов может носить вспомогательный характер. Основным инструментом в прикладных исследованиях такого характера остается преобразование Фурье. В этом случае сохраняется возможность естественной интерпретации результатов исследования. Чтобы убрать из сигнала высокочастотный шум и непериодическую составляющую предлагается применять сингулярные вейвлеты.

Преобразование Фурье. Процесс преобразования сигналов называется фильтрацией. Фильтрацию можно осуществить с помощью ряда Фурье и вейвлет-преобразования. Математической основой спектрального анализа Фурье является преобразование Фурье и ряды Фурье.

Аппарат Фурье-преобразований дает достаточно простые для расчетов формулы и прозрачную интерпретацию результатов, но не лишен и некоторых недостатков. Чтобы применять спектральный анализ Фурье желательнее сигнал представить в виде суммы периодической, случайной и трендовой компоненты.

Вейвлет-преобразование. Традиционно считается, что вейвлет-преобразование является хорошей альтернативой преобразованию Фурье. С помощью вейвлет-преобразования можно найти низкочастотные и высокочастотные характеристики сигнала. Иногда вейвлет-анализ сравнивают с "математическим микроскопом", который позволяет проанализировать сложный сигнал. Вейвлеты широко используются в самых различных областях знаний. Но некоторые специалисты считают, что публикации по вейвлетах в прикладных исследованиях имеют низкую информационную ценность, в работах отсутствует статистическое обоснование результатов и выводов. И для определенного класса задач такое мнение можно считать верным. Возможное объяснение состоит в том, что фундаментальная теория вейвлет-анализа столкнулась с трудностями, которые, насколько нам известно, не нашли отражения в теоретических работах посвященных вейвлетах. Трудности обусловлены тем, что в прикладных исследованиях интерпретация результатов вейвлет-анализа, в отличие от анализа Фурье, является сложной проблемой. Поэтому в данной работе предлагается алгоритм обработки экспериментальных данных, результаты которого сводятся к анализу Фурье. Алгоритм состоит из двух частей. Вначале осуществляется предварительная фильтрация сигнала. Далее отфильтрованный сигнал анализируется с применением спектрального анализа Фурье. Для решения первой задачи применяются сингулярные вейвлеты, которые позволяют избежать амплитудных искажений сигнала. Теперь поясним почему сложно понять и почему ошибочна интерпретация вейвлет-преобразования как аналога и альтернативы для спектрального анализа методом преобразования Фурье.

Недостатки классических вейвлетов. Преобразование Фурье является проекцией функции $f(x)$ на комплексные экспоненты $\exp(i\lambda x)$, где λ – частота колебаний. Спектр Фурье допускает простую физическую интерпретацию. Чем модуль коэффициента Фурье больше, тем амплитуда колебаний больше. Аналогично коэффициент

вейвлет-преобразование $W(a,b)$ является проекцией сигнала на базисный вейвлет. Чем коэффициент больше, тем ближе сигнал напоминает по форме вейвлет. Таким образом вейвлет-преобразование и преобразование Фурье имеют общую математическую основу. Однако нельзя рассматривать вейвлет преобразование как аналог спектрального анализа. Это означает, что нельзя объяснять вейвлет-преобразование в терминах анализа Фурье. Например, выполним вейвлет-преобразование для сигнала $S(x) = \sin(x) + \sin(5x)$, используя вейвлет Морле. Из рисунка 1 «Графическое представление сигнала» следует, что вейвлет-преобразование позволяет правильно оценить наличие периодических составляющих в анализируемом сигнале. Но неспециалисту трудно понять, почему амплитуды сигналов на рисунке 1 «Графическое представление сигнала» значительно отличаются. Поэтому ошибочно считать, что «вейвлет-спектрограммы намного более информативны, чем обычные фурье-спектрограммы». Этот пример подтверждает, что существенным недостатком вейвлет-преобразования является сложная интерпретация получаемых численных значений. Кроме того, результаты использования вейвлетов различного масштаба и частоты плохо сопоставимы между собой из-за неконтролируемого изменения частотных и амплитудных характеристик сигнала. Чтобы уточнить результаты вейвлет-анализа в некоторых случаях можно дополнительно провести спектральный анализ сигнала. Для этого предлагается выполнить предварительную фильтрацию сигнала, используя сингулярные вейвлеты.

Сингулярные вейвлеты. Для классического вейвлета считается, что для базисного вейвлета должно выполняться условие допустимости: среднее значение вейвлета должно равняться нулю: $C_\psi = 0$. Для сингулярного вейвлета удобно считать, что среднее значение равно единице: $C_\psi = 1$. Например, в качестве базисного вейвлета $\psi(t)$ можно использовать дельта-образную функцию нормального распределения, с очень малыми и большими значениями масштаба. Для выделения периодической составляющей сигнала наряду с вейвлет-анализом предлагается проводить спектральный анализ. Для этого выполняется предварительная фильтрация с использованием сингулярных вейвлетов. Сингулярные вейвлеты по форме напоминают дельта-образную функцию. С их помощью решается задача выделения периодической компоненты из экспериментальных данных. С этой целью строится последовательность вейвлет-преобразований на конечном интервала.

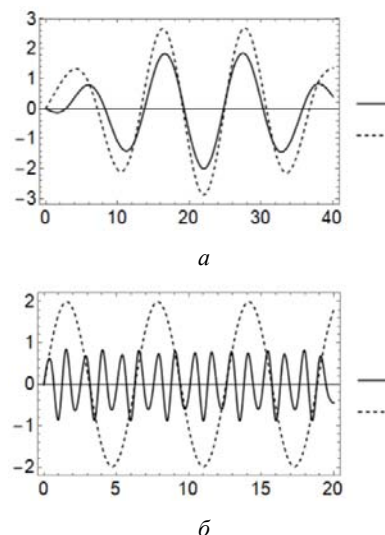


Рисунок 1 – Графическое представление сигнала:
 а – исходный и обработанный сигнал;
 б – $W(1, b)$, $W(5, b)$

Пример. В качестве примера проведен анализ солнечной активности, показателем которой служит среднегодовое число пятен на солнце.

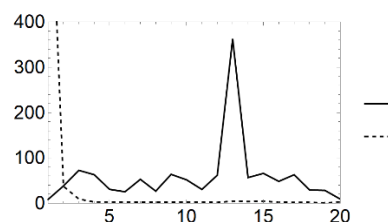


Рисунок 2 – Коэффициенты Фурье для обработанного сигнала и остаточного сигнала

На рисунке 2 «Коэффициенты Фурье для обработанного сигнала и остаточного сигнала», видны амплитуды гармоник, которые соответствуют периоду колебаний солнечной активности в 11 лет.

Выводы. В некоторых случаях для анализа сигнала можно применить предварительную фильтрацию сигнала, используя сингулярные вейвлеты. После предварительной фильтрации можно выполнить спектральный анализ сигнала. Такой подход удобно применять в сочетании с классическим вейвлет-анализом.

Литература

1. Романчук В.М. Аппроксимация сингулярными вейвлетами / В.М. Романчук // Системный анализ и прикладная информатика, 2018. – № 2. – С. 23–28.
2. Романчук В.М. Локальные преобразования с сингулярным вейвлетом / В.М. Романчук // Информатика, 2020. – Т. 17. – № 1. – С. 39–46.

УДК 004

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СОСТАВЛЕНИЯ ИНДИВИДУЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ**Кондратьева Н.А., Гундина М.А., Юхновская О.В.***Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Применение информационных технологий в управлении качеством математической подготовки студентов учреждений высшего образования технического профиля имеет свои особенности: разрабатывается индивидуальный интерактивный тест, который позволяет каждому обучающемуся взаимодействовать с учебным материалом в удобном темпе, осуществлять оценку степени его усвоения; проводится онлайн-тестирование; организуется мониторинг в компьютерных аудиториях и на персональных компьютерах и мобильных телефонах.

Применение электронных материалов в учебном процессе облегчает проведение лекционных и практических занятий по математическим дисциплинам, что позволяет использовать индивидуальный, дифференцированный подход при осуществлении обратной связи между студентом и преподавателем. Такое применение оказывает существенную помощь педагогу при подготовке к занятию.

Целью исследования является разработка и внедрение новых средств обучения математическим дисциплинам с помощью компьютерной системы *Wolfram Mathematica* для повышения качества математической подготовки студентов.

Одной из важных составляющих качества подготовки специалистов технического профиля является их математическая образованность, уровень которой в современных условиях продолжает снижаться. Изучение математики способствует развитию способности к интеллектуальной и творческой деятельности, к восприятию и переработке новой информации, влияет на развитие личностных и профессионально значимых качеств будущих специалистов, позволяющих ему самореализовываться, то есть является средством повышения общего уровня образованности личности. В техническом университете высшая математика выступает как особая образовательная дисциплина, так как является фундаментом для изучения других общеобразовательных, инженерных и специальных дисциплин.

Одним из основных достоинств тестирования является минимум временных затрат на получение надежных итогов контроля. При тестировании используют как бумажные, так и электронные варианты заданий. Последние особенно привлекательны, так как позволяют получить результаты практически сразу по завершении теста.

Актуальным вопросом современной педагогики является определение подходов к управлению самостоятельной учебной деятельностью

обучающихся, которые позволяют усилить проявление индивидуальности студентов и раскрыть их способности к эффективному саморазвитию.

Самостоятельная работа – это метод обучения, при котором познавательная деятельность протекает в полном соответствии с индивидуальными особенностями, уровнем образования, опыта, с одной стороны, и специально созданными для этого организационными условиями, с другой стороны. Самостоятельная работа способствует развитию у студентов познавательных интересов и потребностей, умственной активности и самостоятельности, формированию навыков самостоятельной работы в учебной, научно-исследовательской, профессиональной, социальной сфере, а также опыта принятия решений в различных ситуациях.

Существует множество рекомендаций по организации самостоятельной учебной работы с обучающимися, обладающими высоким уровнем познавательной активности, и со слабо мотивированными обучающимися.

В этой ситуации разработка индивидуальных заданий решает важный аспект самостоятельной деятельности обучающегося.

Облачные технологии внесли коррективы в развитие глобальной структуры потоков информации. В облака была передана значительная часть информационной инфраструктуры, ранее находившейся в отдельных компьютерах [1]. Сейчас образование сложно представить без использования облачных технологий. Широко используются электронные дневники, расписания, журналы, личные кабинеты для обучающихся и преподавателей, интерактивная приемная, тематические форумы, где обучающиеся могут осуществлять обмен информацией. Для организации подобного учебного процесса разрабатываются компьютерные приложения, электронные учебники, электронные учебно-методические комплексы, тренажеры, обучающие системы, разнообразные программные средства, интерактивные лаборатории, телекоммуникационные системы и т.д.

Облачные технологии *Wolfram Cloud (QR-code)* сочетают в себе современный интерфейс ноутбука с производительным языком программирования. Среда *WolframCloud* позволяет с любого компьютера загружать приложение, созданное на языке *WolframLanguage*. Она используется для автоматического выполнения программ и непосредственного создания индивидуализированных мобильных приложений. В ней осу-

поставляется контроль на всех этапах программирования и внедрения приложения в учебном процессе. Команды, написанные в компьютерной системе *WolframMathematica*, в считанные секунды могут быть загружены в виде сайта и предоставлены обучающемуся как независимое приложение. Здесь также важным в процессе создания электронных материалов контроля знаний является управление доступа к внутренней облачной инфраструктуре. Обучающийся, используя тестовое приложения, не имеет возможности открыть страницу в программе и посмотреть код, на котором оно написано.

Среда *WolframCloud* позволяет работать с приложением дистанционно на любом компьютере, требуя лишь одно условие – доступ в сеть Интернет.

Встроенная функция *CloudDeploy* преобразует команду в новый персональный облачный объект. Функция *Delayed* предоставляет выражение, вычисление которого задерживается до того момента, пока это не потребуется. Эта возможность позволяет генерировать при каждом обращении случайный набор тестовых заданий. Облачные объекты, определяемые как отложенные, будут вычисляться в момент запроса к этим данным. Для функции *CloudObject* может быть определено значение опции *Permissions*, которая задает уровень доступа для классов пользователей на выполнение операций. Доступ может быть организован для всех указанных пользователей, только для разработчиков или для разных классов обучающихся.

Для генерации вариантов заданий по теме «Вычисление пределов» использовались следующие команды:

1. `Table[{i,(RandomInteger[6]
x^RandomInteger[5]+(-1)^RandomInteger[2]
RandomInteger[6] x+RandomInteger[10])/`
`(x^(RandomInteger[5]+5)+(-1)^RandomInteger[2]
x+RandomInteger[10])},{i,1,30}].`

2. `Table[{i,(RandomInteger[6]
x^(RandomInteger[5]+5)+(-
1)^RandomInteger[2] RandomInteger[6]
x^(RandomInteger[5]+6)+
RandomInteger[10])/(x^RandomInteger[5]+(-1)^
RandomInteger[2] x+RandomInteger[10])},`
`{i,1,30}].`

3. `For[i=1,i<=30,i++,t=RandomInteger[10];Print[
{i,Expand[(x-t)(x-RandomInteger[{1,3}])/`
`Expand[(x-t)(x-RandomInteger[{4,6}])]}].`

4. `For[i=1,i<=30,i++,t=RandomInteger[10]+1;
Print[{i,Sin[Expand[RandomInteger[{2,6}]]`

`(x-t)(x+RandomInteger[{1,3}])]/`
`Expand[RandomInteger[{1,2}](x-t)`
`(x+RandomInteger[{5,9}]),x->t]}].`

5. `For[i=1,i<=30,i++,t=RandomInteger[10]+1;Print[
{i,Sin[Expand[RandomInteger[{2,6}]`
`ArcTan[(x-t)]]/Expand[RandomInteger[{1,2}](x-t)`
`(x+RandomInteger[{5,9}]),x->t]}].`

6. `For[i=1,i<=30,i++,t=RandomInteger[10]+1;Print[
{i,(1+1/Expand[(t`
`(n+RandomInteger[{1,30}]))]^(n+RandomInteger[{`
`31,50}]))}].`

7. `For[i=1,i<=30,i++,t=RandomInteger[10]+1;
Print[{i,(e^(x-t)-1)/ArcSin[x-t],x->t]}].`

8. `For[i=1,i<=30,i++,t=RandomInteger[10]+1;
Print[{i,Ln[x-RandomInteger[{1,3}]]-Ln[x-
RandomInteger[{4,70}]],x->Infinity}].`

9. `For[i=1,i<=30,i++,t=RandomInteger[10]+1;Print[
{i,(t^(2x)+t^x+RandomInteger[{2,5}])/`
`(RandomInteger[{12,15}]^x+RandomInteger[`
`{2,5}),x->0}].`

10. `For[i=1,i<=30,i++,t=RandomInteger[10]+1;Print[
{i,Sin[x]^2/Expand[(t(1-Cos[t x])),x->0]}].`

После генерации случайных условий заданий осуществляется загрузка блока команд в облако с помощью профиля *WolframCloud*. Кроме всего прочего, система *WolframMathematica* имеет возможность подключения к базе данных *Wolfram KnowledgeBase (QR-code WolframKnowledgeBase)*, в которой можно найти сведения различной природы (географические, механические, медицинские, лингвистические и др. данные).

Интерактивное тестирование, организованное описанным образом, позволяет оперативно и объективно проверить уровень знаний студентов, своевременно ликвидировать затруднения в усвоении материала. Проверка результатов интерактивного тестирования занимает меньше времени по сравнению с другими видами контроля. Обучающиеся получают возможность самостоятельно проверить уровень своих сформированных умений при помощи интерактивного тестирования. Стандартизированная форма оценки знаний, которая используется в интерактивных тестах, позволяет соотнести уровень достижений по дисциплине в целом, по определенным разделам, по конкретным типам задач.

Литература

1. Барков С.А. «Облачные технологии» как этап в развитии информационного общества / С.А. Барков, С.В. Носуленко // Известия Саратовского университета. – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 16–24.

УДК 681.2.082

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СЛОЕВ In_2O_3 ДЛЯ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ

Реутская О.Г.¹, Денисюк С.В.², Куданович О.Н.², Мухуров Н.И.², Лугин В.Г.³, Таратын И.А.⁴

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Минск, Республика Беларусь

³Центр физико-химических методов исследования БГТУ
Минск, Республика Беларусь

⁴ОАО «Минский НИИ радиоматериалов»
Минск, Республика Беларусь

Тонкие металлооксидные пленки, сформированные золь-гель методом, находят широкое применение в качестве чувствительных элементов полупроводниковых газовых сенсоров благодаря возможности получения газочувствительных материалов заданного состава и морфологии. В данной работе представлены результаты исследования морфологии пленок In_2O_3 , сформированных золь-гель методом на подложках из анодного оксида алюминия со слоем никрома. Отжиг полученных структур проводился в вакууме.

Методика эксперимента. Пленка оксида индия была сформирована золь-гель методом на поверхности подложки из анодного оксида алюминия (АОА) со слоем сплава никрома. Образцы в виде квадратов $10 \times 10 \text{ мм}^2$ из нанопористого анодного оксида алюминия толщиной 40 мкм были изготовлены методом анодирования полированной алюминиевой фольги с последующей фотолитографией, удалением металлической основы и отжигом при температуре $860 \text{ }^\circ\text{C}$ [1].

На пористой поверхности подложек из АОА сформирован слой из никрома толщиной 0,3 мкм для изучения совместимости металлоксидных чувствительных слоев и материалов тонкопленочных электродов. Осаждение пленки на основе In_2O_3 на поверхности образцов осуществлялось послойным нанесением каждого из отдельных слоев с промежуточным термическим просушиванием продолжительностью 5 с [2]. На образцы с пленкой никрома наносилась капля коллоидного раствора с последующей сушкой при температуре $100 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 минут. Затем образцы помещались в вакуумную муфельную печь МПВ-3 и вакуумировались до давления в $5 \cdot 10^{-5} \text{ мм. рт. ст.}$ Отжиг проводился при температурах 600 и $750 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1 часа для образцов № 1 и № 2 соответственно.

На образце № 3 золь-гель методом была сформирована пленка на основе In_2O_3 с добавлением Ga_2O_3 (8 %). Образец подвергался термовакуумной обработке при температуре $700 \text{ }^\circ\text{C}$, по аналогии с № 1 и № 2.

Исследование морфологии образцов осуществлялось с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6510LV с бло-

ком энергодисперсионной спектроскопии для определения элементного состава.

Результаты и обсуждение. СЭМ-изображения поверхности образца № 1 (рисунок 1) после отжига в вакууме при температуре $600 \text{ }^\circ\text{C}$ демонстрирует образование однородной несплошной пленки с большим количеством дефектов в виде трещин по всей поверхности. Снимки с большим разрешением показывают результат образования пленки, состоящей из спеченных агломератов с размытыми границами и без четкой огранки. Энергодисперсионный спектр образца № 1 приведен на рисунке 2.

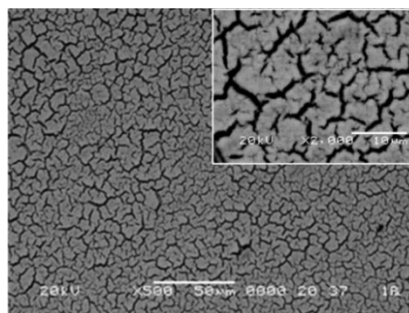


Рисунок 1 – СЭМ-изображение образца № 1, отожженного в вакууме при температуре $600 \text{ }^\circ\text{C}$

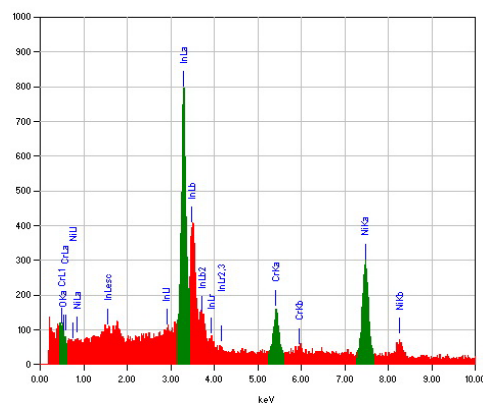


Рисунок 2 – Энергодисперсионный спектр образца № 1

Результаты энергодисперсионного анализа показали наличие в составе поверхности образца не только пиков индия, но и пики никеля и хрома, относящиеся к предварительно сформированной металлической пленке, имитирующей

поверхность токопроводящих элементов газочувствительного сенсора.

Схожие результаты получены при отжиге образцов при температуре 750 °С (образец № 2) – образование несплошной пленки с большим количеством дефектов в виде трещин (рисунок 3), что увеличивает общую площадь поверхности пленки. Энергодисперсионный анализ (рисунок 4) выявляет наличие в составе образца индия, никеля и хрома. Высокая интенсивность пиков никеля и хрома, как и в случае образца № 1, указывает на то, что трещины на поверхности пленки достигают слоя нихрома.

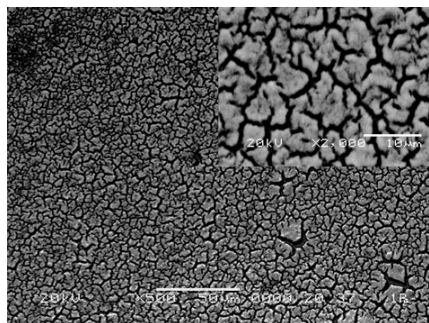


Рисунок 3 – СЭМ-изображение образца № 2, отожженного в вакууме при температуре 750 °С

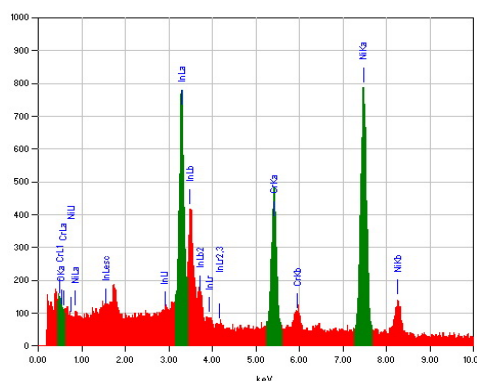


Рисунок 4 – Энергодисперсионный спектр образца № 2

Микрофотография образца № 3 (рисунок 5), отожжённого в вакууме при температуре 700 °С, демонстрирует образование неоднородной по толщине несплошной мелкозернистой пленки с большим количеством трещин на ее поверхности, состоящей из спеченных агрегатов неправильной формы без четких граней и нечеткими размытыми границами. При этом крупные трещины ориентированы преимущественно в одном направлении. Данные энергодисперсионного анализа показали наличие пиков, соответствующих индию, галлия, никелю и хрому, при этом величина пиков никеля и хрома, составляющих

слой из сплава нихром, указывает на сквозной характер трещин пленки $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (рисунок 6).

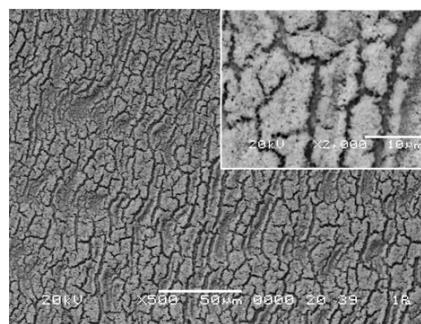


Рисунок 5 – СЭМ-изображение образца № 3, отожженного в вакууме при температуре 700 °С

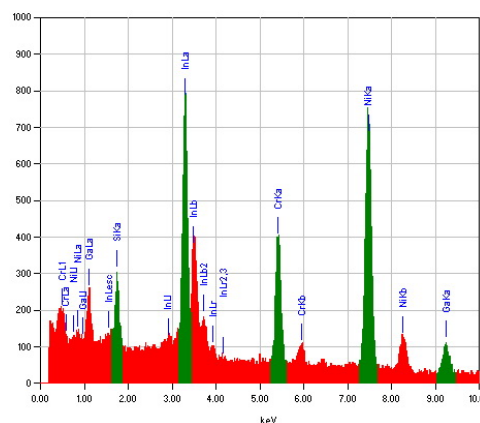


Рисунок 6 – Энергодисперсионный спектр образца № 3

Создание газочувствительных пленок на основе оксида индия, на подложках из анодного оксида алюминия со сформированным слоем нихрома толщиной 0,3 мкм, методами золь-геля с послойным нанесением и финальной термовакуумной обработкой при температурах 600–750 °С, позволяет получать однородные пленки для газовых сенсоров с развитой поверхностью и удовлетворительной адгезией к металлическим слоям.

Литература

1. Денисюк С.В. Пористый анодный оксид алюминия как основа газовых сенсоров / С.В. Денисюк, О.Н. Куданович // Пористые проницаемые материалы: технологии и изделия на их основе: материалы 6-го междунар. симпозиума, посвящ. 45-летию Института порошковой металлургии, Минск, Беларусь, 19–20 октября 2017 г. / Институт порошковой металлургии; редколлегия: А.Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск – Раков, 2017. – С. 430–436.
2. Реутская О.Г. Измерения концентрации газов CO и NO₂ мультисенсорной микросистемой в режиме импульсного нагрева / О.Г. Реутская, Ю.М. Плескачевский // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 2. – С. 160–167.

УДК 621.3

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЕТАЛИ ТИПА «ВАЛ» Скицюк В.И., Клочко Т.Р.

НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
Киев, Украина

Введение. Постановка задачи. Актуальной проблемой точного приборостроения является контроль за точностью изготовления деталей приборов.

Параметрами, которые наиболее полно характеризуют конечное качество прецизионной продукции приборостроения, в частности деталей оптических приборов, метрологических приборов, использующихся в производстве, являются параметры формообразования деталей, их геометрические параметры, шероховатость поверхности, твердость материала детали.

Исследования, проведенные авторами за последние годы [1–3], показывают, что для выполнения полноценного контроля качества валов, например деталей точного контрольно-измерительного прибора, необходимо иметь надежный контроль за размерами (диаметрами) при проведении технологического процесса изготовления деталей. Особенно это касается валов различных размеров для разных приборов. Невозможность определения погрешностей текущего размера диаметра вала приводит к торможению технологических процессов и, как следствие, дефектов и брака при изготовлении точных деталей.

Анализ результатов, полученных другими отечественными и зарубежными учеными, указывает на то, что проблема с измерением диаметра вала практически не развивалась ни в теоретическом, ни в практическом аспектах в течение достаточно длительного времени [4–8], несмотря на ее большую потребность в промышленности, хотя аналогичная проблема возникла и с разработкой методов и средств калибровки диаметра точного вала при изготовлении точных приборов.

Так, в работе [8] показан метод измерения диаметров вала с использованием структурированного измерения светового зрения. После калибровки модели структурированного измерения светового потока виртуальная плоскость устанавливается перпендикулярно измеряемой оси вала, а изображение полосы света на валу проецируется на виртуальную плоскость. На виртуальной плоскости центр измеряемого вала определяется путем подгонки проецируемого изображения под геометрическими ограничениями световой полосы, а диаметр вала измеряется определенным центром и проектируемым изображением. Экспериментальные исследования подтвердили точность измерения метода и влияние некоторых факторов на измерения (рисунок 1).

Недостатками такого метода, несмотря на высокую функциональность измерений, является ограниченность использования, которая предусматривает измерения в практически только лабораторных условиях, при наличии чистой ровной поверхности без посторонних включений и резких перепадов рельефа.

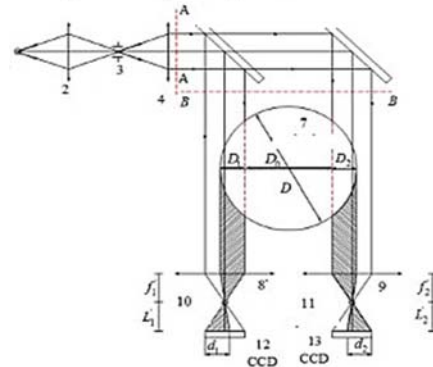


Рисунок 1 – Блок-схема измерительной модели лабораторной установки

Кроме того, является невысокая достоверность определения параметров детали вследствие возможных нарушений идентификации оптического изображения при настройке оптикоэлектронной системы устройства вследствие ее сложности.

Особенно это касается создания технических средств, которые действуют в автоматическом режиме, что подтверждает состояние публикаций по этой проблеме и состояние существующих приборов, которые промышленно выпускаются.

Цель работы. Разработка схематических решений и принципов автоматического контроля параметров формообразования детали типа «вал» в условиях производства для повышения качества изготовления точных приборов.

Метод исследования. Принцип автоматического контроля детали содержит последовательные операции по определению параметров твердости материала детали и шероховатости поверхности локальных участков массы детали. Это связано с регистрацией сигналов изменения созданного вокруг детали электромагнитного поля, возникающие при касании индентора поверхности детали, а также сигналов, которые идентифицируют перемещения индентора относительно поверхности. Итак, измерения микротвердости детали или заготовок непосредственно в системе технологического обрабатывающего оборудования можно проводить по серии измерений в раз-

личных точках поверхности изготовленной продукции или заготовки.

В то же время, основной особенностью способа автоматического контроля является создание интегрированного электромагнитного излучения в оптическом диапазоне, которое содержит три длины волны 460 нм, 530 нм и 635 нм с постоянной мощностью. Излучения направляют на локальную выбранный участок поверхности детали, которую обрабатывают, по нормали к отражающей поверхности в соответствии оптическое излучение. При этом деталь не нужно снимать со станка, что повышает точность контроля.

Сигнал оптического излучения, отраженного от поверхности детали, регистрируют фотоприемным устройством, сигнал от которого поступает в систему обработки сигналов.

Таким образом, анализируют пространственно-частотное распределение световых полей, который имеет зависимость изменения параметров от величины амплитудно-фазового распределения шероховатости поверхности. При этом регистрируют изменение фазы светового излучения, позволяет устанавливать связи величин микровысот профиля поверхности детали и амплитудно-фазового спектра отраженного от поверхности детали оптического излучения. Точность определения зависит от точности измерения сдвига фаз излучения.

Образованное интегрированное излучения, имеет три длины волны, позволяет регистрировать и анализировать комплексный образ поверхности детали. При этом определяют изменения твердости и шероховатости поверхности являются основными параметрами качества детали.

Измерения твердости и шероховатости выполняют поочередно, когда сначала определяют параметры световых полей отраженного излучения, путем обработки сигналов образуют образ определенного участка поверхности, а следующей операцией является погружение индентора в этот участок с целью определения твердости материала.

Результаты исследования. Итак, автоматический контроль заключается в одновременном высокоточном измерении твердости детали, при этом в цепи контрольно-измерительного, технологического оборудования и детали создают стабильное по своей конфигурации и напряженностью электромагнитное поле, а также определяют величины параметров шероховатости поверхности детали путем регистрации и анализа отраженного от поверхности этой детали. Для этого выделяют отдельные участки интегрированного оптического излучения, анализируют и формируют сигнал автоматизированной системы контроля качества изготовления детали.

Таким образом, получая интегрированный информационный сигнал, характеризующий не

только отклонения микротвердости материала в локальном участке измеряемой детали, а также определить шероховатость поверхности, можно повысить точность измерения в 2,5–3 раза в результате анализа динамики связей между изменениями мощности и фазовых изменений сигналов и изменениями твердости и шероховатости поверхности детали для повышения качества контроля при изготовлении прецизионных деталей на станках в условиях автоматизированного производства.

Выводы. Преимуществами разработанного метода автоматического контроля детали, в котором определяют параметры сигналов от систем комплексных преобразователей, которые формируют сигналы, идентифицируют изменения параметров электромагнитных полей, в частности в оптическом диапазоне излучения, в локальной зоне поверхности детали, которые определяют шероховатость поверхности и величину твердости материала, повышает функциональность контроля и точность изготовления детали, поскольку способ контроля не требует снятия детали с обрабатывающего станка.

Литература

1. Skytsiuk Volodymyr. Measurement errors of the shape's parameters of detail's surface by optical instruments / Volodymyr Skytsiuk, Tatiana Klotchko // Bulletin KPI. Series Instrument Making. – 2020. – Iss. 59(1). – P. 71–78.
2. Скицюк В.И. Физика технологии ТОНТОР: монография / В.И. Скицюк, Т.П. Клочко. – Саарбрюкен, Германия: ИД LAP Lambert Academic Publishing, 2015. – 332 с.
3. Tymchyk Gr. S. Basic principles of technological object's touch registration during machining materials / Gregory S. Tymchyk, Volodymyr I. Skytsiuk, Tatiana R. Klotchko, Andrzej Kotyra, Azat Turgunbekov, Saule Smailova // Przegląd Elektrotechniczny, R. 95, NR 4/2019. ISSN 0033-2097.
4. Wei G. Measurement of shaft diameters by machine vision / G. Wei, Q. Tan // Appl Opt. – 2011. – Jul 1; 50(19). – P. 3246-53.
5. Lemeshko Y.A. Precision dimensional inspection of diameters of circular reflecting cylinders / Y.A. Lemeshko, Y.V. Chugui, A.K. Yarovaya // Optoelectron. Instrum. Data Process. – 2007. – 43. – P. 284–291.
6. Xu Y. Double-grating interferometer for measurement of cylinder diameters / Y. Xu, O. Sasaki, T. Suzuki // Appl. Opt. – 2004. – 43. – P. 537–541.
7. Li W. Method of rotation angle measurement in machine vision based on calibration pattern with spot array / W. Li, J. Jin, X. Li, B. Li // Appl Opt. – 2010. – Feb 20;49(6). – P.1001-6.
8. Liu Siyan. Shaft Diameter Measurement Using Structured Light Vision / Siyan Liu, Qingchang Tan, Yachao Zhang // Sensors (Basel). – 2015. Aug; 15(8): 19750–19767.
9. Армарего И. Дж. А. Обработка металлов резанием / И. Дж. А. Армарего, Р.Х. Браун. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
10. Патент 139722 України. МПК (2019.01) G0IN 3/42, G01B11/00. Спосіб автоматичного контролю деталі / В.И. Скицюк, Т.П. Клочко. – Оубл. 10.01.2020.

UDC 621

EXPERIMENTAL STUDIES OF DIESEL FUEL PREPARED FROM OIL PRODUCT WASTE

Slavinskas S.¹, Pauliukas A.¹, Bubulis A.², Vėžys J.²¹Vytautas Magnus University, Kaunas Academy
Kaunas, Lithuania²Kaunas University of Technology
Kaunas, Lithuania

Introduction. The high share of sulfur and high sulfur oil in hydrocarbon stocks and the steady increase in the consumption of their refined products, where sulfur content is strictly regulated, are urgently looking for new cost-effective technologies to reduce total sulfur in primary and secondary petroleum products as well as in the refining stage [1, 2]. Sulfur-containing compounds negatively affect many performance characteristics of petroleum products: automotive fuels reduce stability, sensitivity to additives, increase carbonation and corrosivity. Sulfur-containing compounds adversely affect the operating systems of many petroleum products, sulfur-containing compounds are also active catalytic poisons in many refining processes, and their long-acting catalysts for poisoning are irreversible [3]. The hydrotreating process is widely used to remove sulfur compounds from hydrocarbon fractions, in which the destruction of organic sulfur compounds occurs through the formation of hydrocarbons and hydrogen sulfide [4, 5]. By improving the catalysts and equipment, optimizing the conditions of the hydrotreating process, it is possible to obtain motor fuels that meet the strictest standards [6], but the hydrofining capacity has almost reached the limit and is up to 0.001 % by weight of sulfur in petroleum products. This method is not economically viable [5] and inefficient. As a result, the search for new, non-traditional methods of desulphurisation from fuels, for example as an alternative to hydrogen treatment, can be considered as hydrogen-free methods for the removal of sulfur compounds with the most promising oxidative desulphurisation. A modern alternative to hydrodesulfurization is ultrasonic desulfurization

Methodology. The petroleum product obtained from JUMPS – diesel – was prepared for experimental research in order to determine its performance in comparison with standard diesel (Supply chain) and treated ultrasonic cavitator, together with H₂SO₄ and NaOH solutions. Experimental studies were performed in the JUMPS laboratory with the existing equipment and using the developed tools and chemical preparations H₂SO₄ and NaOH solutions. Microscopic examinations of the samples were performed in the laboratory of KTU Institute of Mechatronics using a microscope NIKON with a video camera Pixelink PL-A662 and a computerized analysis program NisElements. Performance fuel tests were performed on a four-stroke four-cylinder direct injection diesel engine with a displacement of

1,91 dm³ and an 18:1 compression ratio with a common rail fuel injection system (FIAT 1.9 JTD8V). The motor was loaded and the torque was measured with a three-phase asynchronous 110 kW electric dynamometer. Torque measurement accuracy ± 1 Nm. The load was varied from minimum to maximum at constant 1 800 rpm.

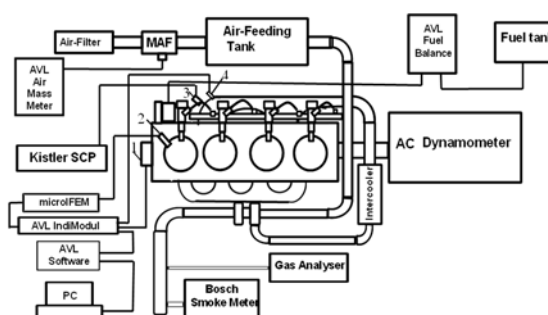


Figure 1 – Engine test bench diagram:

- 1 – AVL encoder; 2 – cylinder pressure sensor;
3 – injector control signal sensor;
4 – boost pressure sensor

Mass fuel consumption was measured with an AVL fuel balance measuring device with an accuracy of $\pm 0,12$ %. Air consumption was measured with an AVL air mass flow meter mounted upstream of the air receiver to reduce airflow pulsations. Accuracy of air flow measurement $\pm 0,25$ %. The engine coolant temperature was maintained between 80 and 85 °C.

The crankshaft speed was measured with an AVL rotation angle encoder 365 C attached to the engine crankshaft with a measurement accuracy of $\pm 0,1$ min⁻¹.

To analyze the combustion process of the engine, individual and 100 indicator cycles summarized were indicated, i. e. pressure variation diagrams in the cylinder. Indicator diagrams were recorded by recording measurement data every 0,1 degree of crankshaft rotation angle using AVL indication and data visualization equipment. The pressure was measured by a piezoelectric uncooled AVL pressure sensor GU24D (measuring range 0–280 bar) built into the head of the first cylinder, connected to a MOCROIFEM piezoelectric signal amplifier. Pressure measurement accuracy $\pm 0,1$ bar. The gas pressure in the cylinder, crankshaft angle, fuel pressure, and injector needle travel signals continued to be fed to the AVL IndiModul 622 display system connected to a personal computer with AVL IndoCom Mobile software display. A summary indicator diagram

of 100 engine operating cycles was used to analyze the engine operating process and calculate the heat release rate.

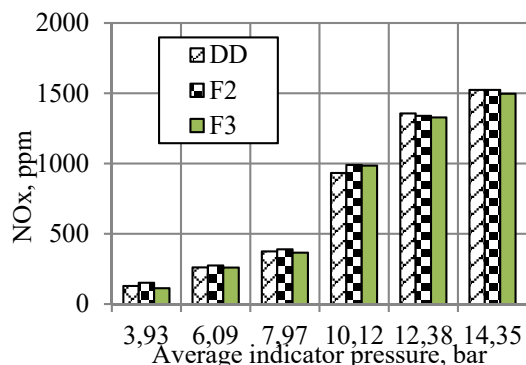


Figure 2 – Influence of fuel on NOx emissions

In diesel engine combustion, the main part of NOx emissions (80–90 %) consists of NO. The rest is NO₂. The formation of NO is highly dependent on the amount of combustible mixture prepared during the spontaneous ignition delay period and burned in the first combustion phase. Comparing the influence of fuel type on NOx emissions (Figure 2), it can be observed that at low and medium loads, these changes correlate with the changes in the spontaneous ignition delay period (Figure 2). At high load, F2 fuel use resulted in lower NOx emissions despite a longer ignition delay period.

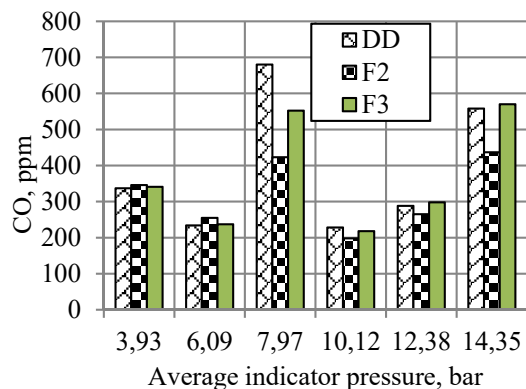


Figure 3 – Influence of fuel on CO emissions

Carbon monoxide (CO) emissions are affected by the presence of a locally fatter combustible mixture (with a lower excess air ratio) in the combustion chamber. As shown in Figure 3, CO emissions were lowest at medium and high loads using F2 fuel. Using F3 fuel, CO emissions were obtained close to carbon monoxide emissions using standard diesel fuel.

The smoke of the combustion products is the highest obtained using standard diesel fuel. In all load modes, with the engine running on F2 and F3 fuels, the opacity (optical transparency) of the flues was lower. This can be explained by the longer ignition delay period (Figure 4.), during which a larger

amount of homogeneous mixture is formed, resulting in a smaller share of diffuse combustion.

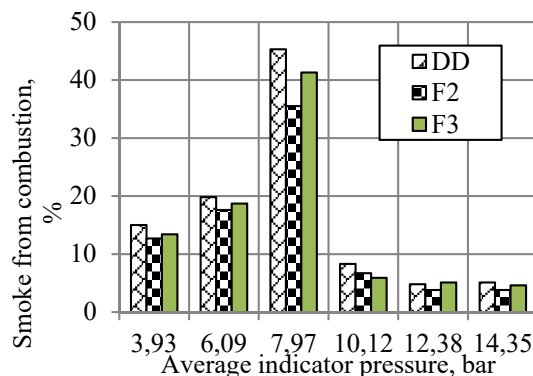


Figure 4 – Influence of fuel type on flue gas smoke

Conclusions. The best results for diesel clarification and acidity were obtained when the diesel was mixed mechanically with sulfuric acid, and after the initial clarification, the introduced NaOH was mixed mechanically and with a cavitator. The duration of the auto-ignition period of the ultrasonic-treated fuel F2 was obtained closer to that of standard diesel fuel. The comparative costs of the tested F2 and F3 fuels were obtained analogous to the costs of standard diesel. The total nitrogen oxide (NOx) emissions from the engine running on ultrasonic F3 fuel were lower than when running on F2 fuel. The smoke of the flue gas with F2 and F3 fuel is lower than with standard diesel.

References

1. Копишев Э. et al. Обессеривание нефтяных продуктов. Сборник материалов XII Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Наука и образование – 2017».
2. Обзор последних достижений в обессеривании нефтяных продуктов. Вестник пгу Химико-биологическая серия, Издается с 1997 года. – № 1, 2017, Павлодар.
3. Iman Najafi, Mohammad Amin Makarem, Mahmood Amani. Application of Ultrasound Waves to Increase the Efficiency of Oxidative Desulfurization Process Copyright © Canadian Research & Development Center of Sciences and Cultures Advances in Petroleum Exploration and Development. – Vol. 2, No. 2. – 2011. – Pp. 63–69.
4. Mohammad Shakirullah, Imtiaz Ahmad, Waqas Ahmad, Mohammad Ishaq Desulfurization study of petroleum products through extraction with aqueous ionic liquids Institute of Chemical Sciences, University of Peshawar, Pakistan, Received: April 20, 2009 – Accepted: May 14, 2010.
5. Anderson K., Atkins M.P., Borges P., Chan Z.P., Rafeen M.S., Sebran N.H. Economic analysis of ultrasound-assisted oxidative desulfurization., Vleeming J.H. Economic analysis of ultrasound-assisted oxidative desulfurization. Energy Sources, 2017, 12(4), pp. 305–311.
6. Гриднева Е.С. Десульфурация нефтепродуктов под действием ультразвука: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук (20.05.10). – М.: 2010. – 28 с.

УДК 678.057.9

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ПО ПОДГОТОВКЕ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАЛИВКЕ НАПОЛНЕННЫХ И НЕПОЛНЕННЫХ МУЛЬТИКОМПОНЕНТНЫХ ГИБРИДНО-КОМПОЗИТНЫХ СМЕСЕЙ

Ксенофонтов М.А., Васильева В.С., Выдумчик С.В., Гавриленко О.О., Горохов С.Л., Павлюкевич Т.Г., Понарядов В.В.

*Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Возрастающий интерес к получению изделий, обладающих особыми свойствами, из композитных смесей на основе акрилатных, эпоксидных, полиуретанэпоксидных и других полимерных составов требует создания специализированного технологического оборудования, обеспечивающего специфические особенности технологии заливки.

В данной работе представлен многофункциональный комплекс с широким набором базовых функций, которые позволяют полностью автоматизировать задачу подготовки исходных компонентов (термостатирование, гомогенизация, дегазация), высокоточное дозирование, смешение в нужной пропорции, позиционную точечную заливку в формы по заданной программе мультикомпонентных наполненных и ненаполненных полимерных систем, различающихся по вязкости и температурам переработки.

Новизна разработки заключается в том, что оборудование позволяет выполнять переработку одновременно двух разных полимерных систем, отличающихся составом, введенными наполнителями и температурными режимами. Сдвоенная система дозирования с двумя смесительными устройствами позволяет проводить поочередную заливку двух разных полимерных смесей. Благодаря этому возможно производство изделий, требующих нанесения нескольких слоев материала с различными физико-механическими свойствами без прерывания процесса и остановки оборудования для смены системы компонентов.

Комплекс оснащен специализированной системой управления и контроля с функцией «удаленного управления», что позволяет обезопасить персонал при работе, минимизировав влияние вредного воздействия компонентов. Программирование, контроль технологических параметров и состояния отдельных узлов с визуализацией параметров в режиме «реального времени», управление роботизированным манипулирующим устройством, задание дозы и позиций заливки осуществляется специализированной управляющей программой с персонального компьютера. Центральным узлом системы управления является оригинальный многофункциональный девятиосевой контроллер движения, связанный с сервоприводами координат и движением дозаторов, постоянно проводящий диагностику составных частей комплекса и помещающий ак-

туальную информацию о состоянии в массив данных, передаваемых в управляющий компьютер.

Комплекс (рисунок 1) функционально состоит из двух основных частей: дозирующе-смесительного оборудования и роботизированного манипулирующего устройства.



Рисунок 1 – Многофункциональный комплекс по подготовке и автоматической заливке наполненных и ненаполненных мультикомпонентных гибридно-композитных смесей

Дозирующе-смесительное оборудование выполнено в виде двух автономных модулей заливочных установок [1]. В состав каждого модуля входит двухсекционный термобокс (рисунок 2), внутри которого размещены рабочие емкости, дозирующие узлы и соединительные трубопроводы. В каждой секции осуществляется индивидуальный нагрев (до +90 °С), контроль и поддержание заданной температуры.

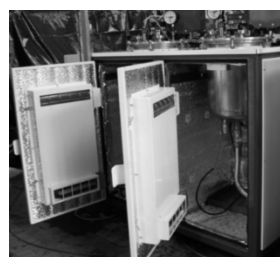


Рисунок 2 – Термобокс

Подготовка компонентов проводится в рабочих емкостях, которые оснащены перемешивающими устройствами с регулировкой оборотов, системой вакуумирования для дегазации составов, мановакууметрами, контролирующими глубину вакуума, ультразвуковыми датчиками, непрерывно отслеживающими уровень компонентов.

Подача компонентов в требуемом количестве из рабочих емкостей в смесительное устройство выполняется специально разработанными порш-

невыми дозаторами. Дозатор поршневой конструктивно представляет собой одноплунжерный насос циклического типа с приводом от серводвигателя посредством шарико-винтовой передачи.

Такой тип дозирующей системы является наиболее универсальным в сравнении с используемыми обычно шестеренными насосами и позволяет дозировать составы высокой вязкости, наполненные мелкодисперсными порошками, стеклянными микросферами и пр., а также ненаполненные жидкие системы с высокой текучестью и вязкостью меньше 100 мПа·с.

Для обеспечения однородности составов и равномерного распределения наполнителей по всему объему предусмотрена система автоматической рециркуляции, которая позволяет прокачивать каждый из компонентов по замкнутому контуру: емкость – дозатор – смесительное устройство – емкость, тем самым предотвращая образование застойных зон в паузах между заливками. В состав системы входят теплоизолированные, электрообогреваемые рукава для компонентов и электрообогреваемые краны рециркуляции с пневмоприводом.

Смешивание компонентов происходит в устройстве со статическим типом перемешивания [2] и осуществляется с помощью специального лабиринтного устройства (статического смесителя), не имеющего подвижных частей. Перемешивание происходит за счет многократного разделения потоков в трубке и поворотов, определяемых количеством и формой смесительных элементов. Смесительное устройство (рисунок 3) состоит из электрообогреваемого корпуса, в котором расположены два впускных клапана игольчатого типа с пневмоприводом, клапана промывки с пневмоприводом, клапана продувки с пневмоприводом и статического смесителя. Механическое разделение потоков компонентов обеспечивается вплоть до статического смесителя, для очистки которого от жидких остатков смеси предусмотрена многоступенчатая автоматическая система: вытеснение реакционной смеси одним из компонентов, далее промывка растворителем и продувка сжатым воздухом.

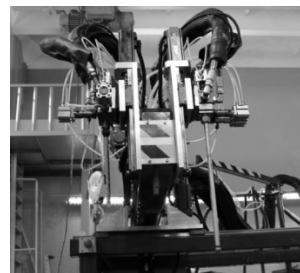


Рисунок 3 – Смесительное устройство

Смесительные устройства установлены на подвижных площадках координатных осей Z1 и Z2 роботизированного манипулирующего устройства, которое выполняет по заданной программе их перемещение по точкам заливки.

Роботизированное манипулирующее устройство представляет собой координатную систему консольного типа, состоящую из рамы манипулятора, линейных взаимно перпендикулярных координатных осей X, Y и двух Z с приводами, бокса серводрайверов и шкафа контроллера движения. Привод координатных осей X, Y – зубчато-реечный, Z1 и Z2 – ШВП, двигатели – сервомоторы.

Многофункциональный комплекс по подготовке и автоматической заливке мультикомпонентных композитных смесей воплощает в себе современные научные, инженерные, технологические решения и является универсальным оборудованием для использования в различных сферах промышленности (электронике, электротехнике, авто-, судо-, самолето- и ракетостроении), а благодаря высокому уровню автоматизации технологического процесса позволит получать качественные изделия, значительно снизить трудозатраты и увеличить производительность, сократив долю ручного труда на предприятии.

Литература

1. Патент № 7634 РБ, МПК⁶ В 29С 67/20. Установка заливочная смесительно-дозировочная / М.А. Ксенофонтов и др. – Оpubл. 2011.10.30, Бюл. № 5 (82). – 3 с.: ил.
2. Патент № 6816 РБ, МПК⁹ В 29С 67/20. Установка заливочная смесительно-дозировочная / М.А. Ксенофонтов и др. – Оpubл. 2010.12.30, Бюл. № 6 (77). – 4 с.: ил.

УДК 621.7.620.186

**СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ ОДНОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ
ОКСИДОВ ТАНТАЛА И АЛЮМИНИЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ**Кузнецова Т.А.^{1,2}, Лапицкая В.А.^{1,2}, Петровская А.С.¹, Мельникова Г.Б.¹, Хабарова А.В.¹,
Чижик С.А.^{1,2}, Зыкова А.В.³, Сафонов В.И.³¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь³ННЦ Харьковский физико-технический институт НАН Украины
Харьков, Украина

Металлы и их сплавы широко используются во всех областях науки, техники и медицины. В био-медицинских устройствах металлы используются благодаря своей инертности и структурным функциям. Обычно, они предпочтительнее полимеров или керамики (особенно в тех случаях, когда имплантаты подвергаются статическим, динамическим или циклическим нагрузкам, которые требуют сочетания прочности и пластичности) [1]. Хотя достаточно большое количество металлов и их сплавов используется в медицинских устройствах, наиболее распространенными являются нержавеющие стали, химически чистый титан и титановые сплавы и сплавы на основе кобальта [2], а также тантал, алюминий и их оксиды.

Целью работы являлось изучение структурно-морфологических характеристик и наномеханических свойств однослойных наноструктурированных покрытий оксидов тантала и алюминия, нанесенных методом магнетронного распыления на металлические подложки. Известна взаимосвязь микроструктурного состояния поверхности и механических свойств покрытий [3].

Морфологию поверхности наноструктурированных пленок исследовали на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Dimension FastScan (Bruker, США) в режиме PeakForce Tapping QNM. Использовали стандартные кремниевые кантилеверы MPP12120-10 (Bruker, США) с радиусом кривизны острия зонда 10 нм и жесткостью консоли 5,72 Н/м. Радиус кривизны острия зонда определяли с помощью эталонного образца RS-12M (образец шероховатости поликристаллического титана).

На рисунке 1, *а* представлена структура поверхности стали типа 316L SS. На основании полученных АСМ-изображений было установлено, что полированная поверхность стали имеет зерненую структуру. Размер зерна составляет 30–40 нм. После нанесения пленки оксида тантала на нержавеющую сталь на некоторых участках поверхности покрытия появляются островки оксидной пленки (рисунок 1, *б*). Высота образовавшихся островков составляет 5,5 нм, размер 100-500 нм.

На рисунке 2 приведены результаты исследования структуры поверхности пленок Al_2O_3 . Установлено, что поверхность состоит из зерен,

форма которых близка к сферической. Размер зерен в алюмооксидных пленках примерно одинаков и составляет порядка 100 нм (рисунок 2, *б*), что согласуется с ранее полученными результатами АСМ-исследований пленок Al_2O_3 [4].

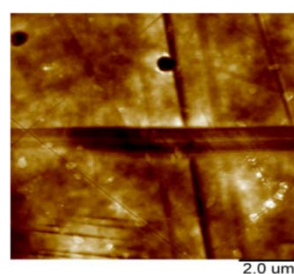
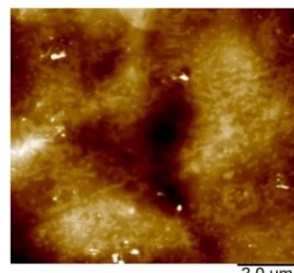
*а**б*

Рисунок 1 – АСМ-изображения поверхности:
а – сталь 316L SS (10x10 мкм²), *б* – пленка оксида тантала (10x10 мкм²)

Максимальный перепад (размах) высот можно рассматривать как толщину поверхностного слоя, который не полностью заполнен материалом и в котором происходит изменение рельефа, ниже данного слоя предположительно лежит сплошной материал [5]. Для исследованных пленок данный параметр не превышает 20 нм, что составляет около 2 % от общей толщины пленки.

Параметры шероховатости для алюмооксидной пленки с увеличением площади сканирования изменяются незначительно, что свидетельствует о равномерности наносимого покрытия. За счет малого размера частиц и перепада высот достигаются пониженные значения Ra. В целом, невысокие значения шероховатости предполагают возможность применения таких пленок для медицинского использования.

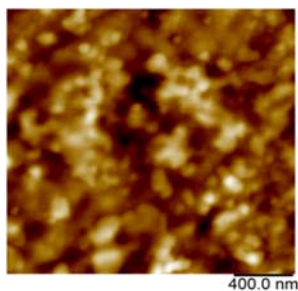


Рисунок 2 – АСМ-изображения поверхности оксида алюминия ($2 \times 2 \text{ мкм}^2$)

Немаловажной характеристикой материала является адгезионная, так как существует высокий риск образования тромбов на имплантируемом материале. Значения силы адгезии и удельной поверхностной энергии были определены на полях сканирования $5 \times 5 \text{ мкм}$ и $10 \times 10 \text{ мкм}$ (таблица 1) [6]. Установлено, что напыление пленки оксида тантала на нержавеющую сталь приводит к уменьшению значений силы адгезии на 61%. Поверхностная энергия при этом составляет $0,42 \text{ мДж/м}^2$. Сила адгезии алюмооксидной пленки значительно выше танталовой и составляет $58,03 \text{ нН}$. Следовательно, данное покрытие менее подходит для медицинского применения.

Таблица 1 – Значения силы адгезии и удельной поверхностной энергии оксидных пленок тантала и алюминия на металлических подложках

Образец	$F_{adh}, \text{ нН} \pm 10 \%$		$\gamma, \text{ мДж/м}^2$	
	$5 \times 5 \text{ мкм}$	$10 \times 10 \text{ мкм}$	$5 \times 5 \text{ мкм}$	$10 \times 10 \text{ мкм}$
Сталь 316 L SS	56,19	49,99	1,19	1,06
Ta ₂ O ₅ / (316 L SS)	36,93	19,69	0,78	0,42
Al ₂ O ₃ / (алюминиевый сплав Д16)	84,91	58,03	1,80	1,23

Заключение. В результате проведенных исследований поверхности стали и алюминиевого сплава с напыленными пленками оксидов тантала и алюминия методом атомно-силовой микро-

скопии установлено, что структура полученных покрытий существенно отличается.

Для пленки оксида тантала на нержавеющей стали характерна плотная гладкая поверхность, для оксида алюминия – нанозернистая микро-структура. Методом АСМ было зафиксировано снижение силы адгезии на 61% после нанесения оксида тантала на нержавеющую сталь, что в дальнейшем позволит уменьшить агрегацию тромбоцитов на поверхности имплантатов. Сила адгезии на поверхности алюмооксидной пленки составила $58,03 \text{ нН}$.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Т20УКА-030)

Литература

1. Mahapatro A. Bio-functional nano-coatings on metallic biomaterials / A. Mahapatro // Materials Science and Engineering: C. – 2015. – Vol. 55. – P. 227–251.
2. Davis J.R. Handbook of Materials for Medical Devices / J.R. Davis. – USA: ASM International, 2003. – 341 p.
3. Углов В.В. Взаимосвязь микроструктурного состояния поверхности и механических свойств углеродных и металл-углеродных покрытий, формируемых плазмо-усиленным химическим вакуумным осаждением / Углов В.В. и др. // Перспективные материалы. – 2003. – № 6. – С. 5–11.
4. Михайлов В.И. Получение и физико-химические свойства материалов на основе нанодисперсных оксидов алюминия и железа (III): дис. канд. хим. наук: 02.00.04 / В.И. Михайлов. – Сыктывкар, 2016. – 129 с.
5. Новак А.В. Шероховатость пленок аморфного, поликристаллического кремния и поликристаллического кремния с полусферическими зёрнами / А.В. Новак, В.Р. Новак // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39. – № 19. – С. 32–40.
6. Кузнецова Т.А. Микронды для определения силы адгезии и удельной поверхностной энергии методом атомно-силовой микроскопии / Т.А. Кузнецова, Н.В. Чижик, Т.И. Ширяева // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 1 (6). – С. 41–45.

УДК 533.9.082.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН НА СВЧ РАЗРЯД В ПЛАЗМОТРОНЕ РЕЗОНАТОРНОГО ТИПА

Мадвейко С.И., Тихон О.И., Тодин П.А., Бордусов С.В., Достанко А.П.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

В настоящее время технология плазменной обработки полупроводниковых материалов является неотъемлемой частью технологического процесса изготовления современных устройств микро- и нанoeлектроники. В связи с ростом масштабов производства в промышленности осуществляется переход на обработку кремниевых подложек всё большего диаметра, что обуславливает необходимость разработки, применения и исследования характеристик плазменных

источников, способных обеспечивать качественное выполнение технологических операций на поверхностях большой площади.

Одним из методов плазменной обработки является использование нестационарного сверхвысокочастотного (СВЧ) разряда. Выполнение современных требований, предъявляемых к новому СВЧ плазмохимическому технологическому оборудованию, осуществляется за счет применения в его конструкции объемных резонаторов.

Конструктивные решения резонатора, являющиеся системой формирования СВЧ поля, позволяют обеспечить формирование СВЧ разряда большого объёма при использовании магнетронов средней мощности [1]. Конструкция разрядного узла и характеристические размеры разрядного объёма в совокупности с прочими факторами (величина подводимой СВЧ мощности, тип волны, давление, тип рабочего газа и др.) оказывают влияние на пробойные условия газового разряда. Величина пробивной напряженности электрического поля в объемном резонаторе $E_0 = 110$ В/см для среднего вакуума может достигаться уже при мощностях свыше 50 Вт [2].

Целью проводимых исследований являлось изучение влияния площади кремниевых пластин, помещённых в объём крупногабаритной плазменной камеры СВЧ плазмотрона, на особенности формирования СВЧ разряда и его временные нестабильности.

Для проведения исследования использовалась экспериментальная СВЧ вакуумно-плазменная установка резонаторного типа. Схематическое изображение реакционно-разрядной системы установки представлено на рисунке 1 [1]. В центре объемного резонатора размером $40 \times 40 \times 30$ см располагается выполненная из кварцевой трубы камера диаметром 20 см вакуумируемая разрядная камера длиной 34 см, в которую помещались Si пластины толщиной 0,5 мм. Для генерации вводимой в резонатор через прямоугольное отверстие связи электромагнитной энергии используется СВЧ магнетрон М-105 с рабочей частотой 2,45 ГГц и средней рабочей мощностью 650 Вт.

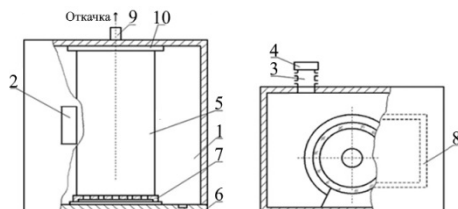


Рисунок 1 – Реакционно-разрядная система СВЧ плазменной установки:

1 – резонатор; 2 – отверстие связи; 3 – волновод;
4 – магнетрон; 5 – реакционно-разрядная камера;
6 – передняя стенка резонатора; 7 – передняя крышка камеры; 8 – смотровое окно; 9 – патрубок для откачки;
10 – задняя крышка камеры

В качестве плазмообразующей среды использовался атмосферный воздух, давление в разрядной камере устанавливалось на уровне 240 Па. При проведении экспериментов регистрировались сигналы анодного напряжения и анодного тока СВЧ магнетрона. Также снимались представленные на рисунке 2 уровни СВЧ электромагнитного переизлучения из резонаторной камеры и оптического свечения плазмы СВЧ разряда при различной площади поверхности Si пластин, размещенных в реакционно-разрядном

объёме плазмотрона. Для фиксации уровня переизлучения была использована рупорная антенна, оптический сигнал регистрировался с помощью фотозлектронного умножителя.

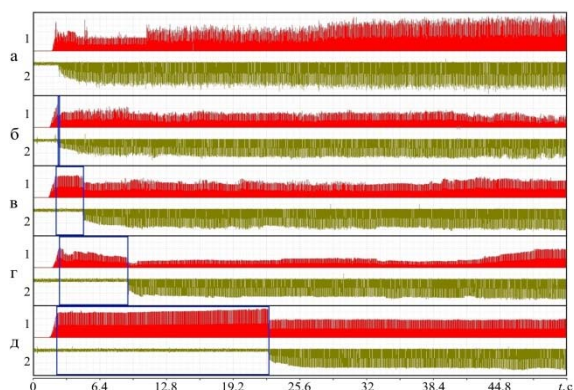


Рисунок 2 – Осциллограммы сигналов уровня электромагнитного переизлучения (1) и оптического свечения СВЧ плазмы (2) при различной площади поверхности обрабатываемых кремниевых пластин:
а – без пластин; б – 14 200 мм²; в – 28 400 мм²;
г – 42 600 мм²; д – 48 100 мм²

Генерация плазмы СВЧ разряда происходит при достижении в объёме резонатора определенной величины напряженности электрической составляющей электромагнитного поля. Однако при помещении в плазму объектов обработки необходимо учитывать «эффект загрузки» рабочей камеры. В частности, пластины монокристаллического кремния, расположенные в области СВЧ плазмообразования оказывают влияние на процесс формирования плазмы. Это связано с высоким тангенсом угла диэлектрических потерь Si пластин, что приводит к частичному поглощению ими СВЧ мощности как на стадии возбуждения плазмы СВЧ разряда, так и в процессе её поддержания [3]. Экспериментально установлено, что увеличение площади обрабатываемых кремниевых пластин при неизменных условиях электропитания СВЧ магнетрона приводит к увеличению времени задержки процесса плазмообразования (рисунок 3). Причиной этого может являться расходование СВЧ энергии на нагрев пластин, при котором происходит уменьшение их удельного сопротивления.

Было проведено поимпульсное изучение величины и формы сигналов интегрального оптического свечения плазмы СВЧ разряда в различные моменты времени процесса плазмообразования в зависимости от площади поверхности кремниевых пластин в зоне обработки. Полученные результаты представлены в виде диаграмм распределения на рисунке 4. Также был выполнен анализ разброса амплитуды импульсов осциллограмм интегрального оптического свечения плазмы СВЧ на участке 2 (рисунок 4, а). Характер изменения временных нестабильностей оптического свечения приведён на рисунке 5.

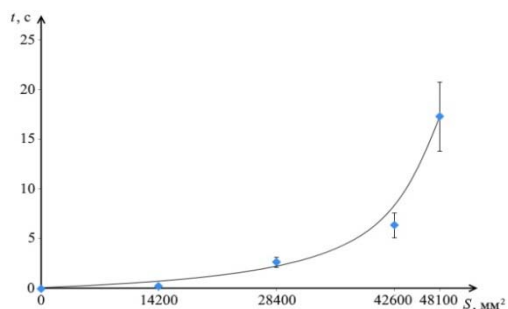


Рисунок 3 – Зависимость времени задержки возбуждения СВЧ разряда от площади поверхности Si пластин, размещенных в реакционной камере

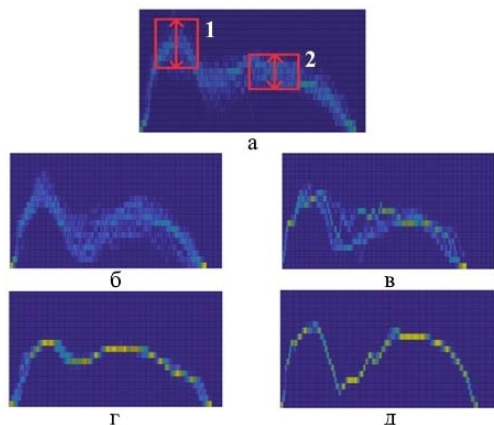


Рисунок 4 – Диаграммы распределения амплитуды импульсов оптического свечения при различной площади поверхности Si пластин, размещенных в реакционном объеме:

a – без пластин; $б$ – 14 200 mm^2 ; $в$ – 28 400 mm^2 ; $г$ – 42 600 mm^2 ; $д$ – 48 100 mm^2

Из представленной на рисунке 5 зависимости следует, что при увеличении площади находящейся в области разряда кремниевых пластин наблюдается повышение стабильности (до 4 раз) амплитуды импульсов интегрального оптического свечения плазмы. Рост повторяемости им-

пульсов указывает на повышение стабильности вклада генерируемой магнетроном СВЧ энергии в газовый разряд.

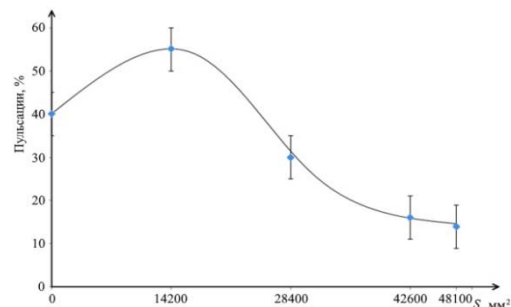


Рисунок 5 – Характер изменения временных нестабильностей оптического свечения плазмы пульсирующего СВЧ разряда от площади поверхности Si пластин, размещенных в реакционной камере

Таким образом, СВЧ плазменный разряд большого объема, формируемый в плазматроне резонаторного типа, характеризуется достаточно высоким уровнем стабильности и способен обеспечить обработку кремниевых пластин диаметром до 200–300 мм, которые широко используются в настоящее время в полупроводниковом производстве.

Литература

1. Бордусов С.В. Плазменные СВЧ-технологии в производстве изделий электронной техники / С.В. Бордусов; под ред. А.П. Достанко. – Минск: Бестпринт, 2002. – 452 с.
2. Madveika S.I. Theoretical analysis of low vacuum microwave discharge exciting and maintaining conditions in resonator type plasmatron / S.I. Madveika, S.V. Bordusau // Plasma Physics and Technology. – 2015. – V. 2, № 2. – P. 155–158.
3. Investigation of silicon wafers' influence on the local microwave power values in a resonator-type plasmatron/ S. Madveika [et al.] // Plasma Physics and Technology. – 2019. – V. 6, № 3. – P. 239–242.

УДК 621.7.620.186

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ НИКЕЛЕВОГО ПОКРЫТИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ФОСФОРОМ

Лапицкая В.А.^{1,2}, Кузнецова Т.А.^{1,2}, Хабарова А.В.¹, Трухан Р.Э.^{1,2}, Чижик С.А.^{1,2}, Куприн А.С.³, Кудин Д.В.³, Конеру А.⁴

¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

³ННЦ Харьковский физико-технический институт НАН Украины
Харьков, Украина

⁴Somnio Global
Новай (Novi)США

Никелевые покрытия, содержащие фосфор, благодаря высокой твердости, износостойкости и коррозионной стойкости, в настоящее время применяют для повышения износостойкости

трущихся поверхностей и защиты от коррозии изделий из стали и цветных металлов, а также защита от электромагнитных помех, в МЭМС [1, 2]. В научно-технической литературе в основ-

ном описаны исследования покрытий NiP, полученных электролитическим и химическим методами [3, 4] и практически отсутствуют сведения о вакуумно-дуговых никелевых покрытиях.

Использование малых добавок фосфора в мишени для распыления приводит к присутствию атомов фосфора на поверхности при формировании покрытия как активных центров кристаллизации и образованию нанокристаллической беспористой структуры.

Внедрение атомов фосфора в кристаллическую решетку Ni в малых количествах (1–2 ат. %) способствует повышению его механических свойств за счет искажений решетки. Свойства вакуумных покрытий могут значительно превосходить электролитические [4].

Целью работы являлось исследование методами атомно-силовой микроскопии и наноиндентирования морфологии поверхности и механических свойств вакуумно-дугового никелевого покрытия, легированного фосфором.

Вакуумно-дуговое никелевое покрытие было нанесено вакуумно-дуговым методом на установке «Булат». Распыляемый катод содержал 6 % фосфора, ток катодной дуги был равен 100 А, напряжение смещения на подложке составляло – 50 В. Покрытие толщиной 2 мкм с концентрацией фосфора 2 ат. % наносили на подложку из нержавеющей стали 08X18H10T.

Поверхность покрытия исследовали с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JSM-7001F (JEOL, Япония) с микроанализатором (МРСА).

Морфологию поверхности покрытия исследовали на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Dimension FastScan (Bruker, США) со стандартным кремниевым кантилевером типа MPP12120-10 (производство Bruker, США), с радиусом закругления острия 10 нм и жесткостью консоли 4,79 Н/м, в режиме PeakForce QNM. Исследования морфологии и шероховатости поверхности покрытия с использованием АСМ проводилось на полях нескольких размеров.

Измерения микротвердости Н и модуля упругости Е проводились на наноинденторе Hysitron 750 Ubi (США) с предварительным сканированием поверхности путем внедрения алмазной пирамиды Берковича с радиусом кривизны острия 150 нм с регистрацией 10 деформационных кривых зависимости глубины внедрения от приложенной нагрузки. Нагрузка составляла 5 мН.

По результатам исследования установлено, что на поверхности наблюдаются сферические образования диаметром около 4 мкм, также наблюдаются и более крупные образования с размерами 8 мкм в ширину и 13 мкм в длину

(рисунок 1). При исследовании морфологии поверхности методом АСМ определена шероховатость (Ra, Rq, Rz) на покрытии на полях разных размеров от 60×60 до 1×1 мкм² (таблица 1).

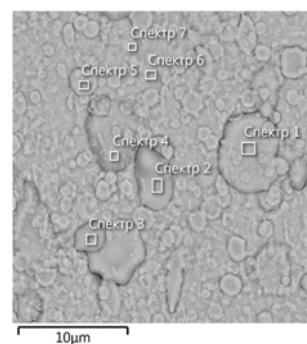
Таблица 1 – Шероховатость поверхности покрытия, полученная методом АСМ

Размер поля, мкм	Ra, нм	Rq, нм	Rz, нм
60×60	121,0	191,0	602,0
40×40	96,3	153,0	349,0
10×10	35,0	49,8	787,0
3×3	17,9	25,4	63,1
1×1	11,4	14,2	32,5

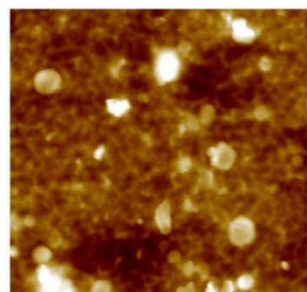
По результатам МРСА установлено, что на поверхности покрытия присутствует несколько фаз, различающихся составом (рисунок 1, а, таблица 2). Некоторые частицы (спектры 1, 4, 6 и 7 на рисунке 1, а) и основная поверхность состоит практически из никеля. Другие частицы (спектры 2, 3, 5 на рисунке 1, а) имеют в своем составе, помимо никеля, фосфор.

Таблица 2 – Данные МРСА

Спектр	P	Cr	Fe	Ni
1	3,09	1,29	4,55	91,07
2	10,31	0,99	4,28	84,42
3	9,17	1,10	4,53	85,20
4	2,41	0,52	4,09	92,98
5	4,86	0,99	4,35	89,80
6	1,43	1,03	4,80	92,74
7	1,64	1,0	5,05	92,15



а



б

Рисунок 1 – Изображения поверхности покрытия NiP:
а – СЭМ с указанием мест анализа МРСА;
б – АСМ

Различия в химическом составе областей на поверхности покрытия вызваны разным содержанием в них фосфорной составляющей. Это приводит к тому что как модуль упругости, так и микротвёрдость имеют такое различие в значениях. По результатам наноиндентирования установлено различие в модуле упругости E и микротвёрдости H на различных фазах от 57 до 228 ГПа и от 2,6 до 9,1 ГПа соответственно. Это свидетельствует о том, что на поверхности покрытия присутствуют различные фазы. Также определены упругая и пластическая составляющие деформации при индентировании на различных фазах. Эти данные получены на основе кривых наноиндентирования. Полученные результаты соответствуют результатам работы [6] о взаимосвязи микроструктурного состояния поверхности и механических свойств покрытия.

Заключение. Методом атомно-силовой микроскопии и наноиндентирования проведены исследования морфологии поверхности и механических свойств никелевого покрытия, легированного фосфором. По результатам исследования методом АСМ установлено, что на поверхности покрытия содержится большое количество частиц различных размеров. Результаты микрорентгеноспектрального анализа показали, что на поверхности покрытия несколько фаз, различающихся содержанием фосфора.

Исследование механических свойств проводили на различных фазах. По результатам НИ установлено существенное отличие в значениях

модуля упругости E и микротвёрдости H из-за содержания фосфора.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Ф20М-083)

Литература

1. Вопросы изнашивания NiP покрытий / И.Р. Асланян, Л.Ш. Шустер // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Механика и машиностроение. – 2011. – Т. 13, №4(3). – С. 951–954.
2. S Chizhik, Micro and Nanoscale Wear Studies of HDD Slide Bearings By Atomic Force Microscopy / S Chizhik, A Khudoley, T Kuznetsova, K Wierzcholski, A Miszczak // 2010, Proceedings of Methodological Aspects of Scanning Probe Microscopy, Heat and Mass Transfer Institute of NAS, pp 247–252.
3. Microgroove machining on crystalline nickel phosphide plating by single-point diamond cutting / Y. Liu, W. Zhao, T. Zhou, X. Liu, X. Wang // Int J Adv Manuf Technol. – 2017. – Vol. 91. – P. 477 – 484.
4. Friction and wear behavior of electroless Ni–P and Ni–W–P alloy coatings / M. Palaniappa, S.K. Seshadri // Wear. – 2008. – Vol. 265. – P. 735–740.
5. Kuznetsova T.A., Andreev M.A., Markova L.V., Chekan V.A. Wear resistance of composite chrome coatings with additives of ultradispersed diamonds // Journal of Friction and Wear. – 2001 (22), № 4, pp. 423–428.
6. Углов В.В. Взаимосвязь микроструктурного состояния поверхности и механических свойств углеродных и металл-углеродных покрытий, формируемых плазмо-усиленным химическим вакуумным осаждением / Углов В.В и др. // Перспективные материалы. – 2003. – № 6. – С. 5–11.

УДК 621.3.049

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В КРИСТАЛЛАХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ ПРИ МОНТАЖЕ НА ПОДЛОЖКУ

Ланин В.Л., Достанко А.П.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь*

Монтаж кристаллов интегральных схем в корпус или на подложку должен обеспечить высокую прочность соединений при термостабильности и механических нагрузках, низкое электрическое и тепловое сопротивление, минимальное механическое воздействие на кристалл и отсутствие загрязнений.

В настоящее время для монтажа кристаллов широко используются методы вибрационной эвтектической пайки поверхности кристалла к основанию корпуса с использованием припоя Au–Si и золотого покрытия соединяемых элементов [1]. Для обеспечения необходимой смачиваемости припоем и предотвращения окисления в процессе пайки используют формирующий газ на основе смеси 10 % водорода и 90 % азота. Нанесение припоя на подложку осуществляется

дозированием проволоки припоя или паяльной пасты, либо припойными прокладками.

Монтаж кристалла на эвтектической сплавной пайке помимо технологических трудностей (высокие температуры, золотое покрытие) имеет и другие недостатки. В виду малой пластичности эвтектики Au–Si и разницы в коэффициентах термического расширения кристалла и подложки в кристалле возникают значительные механические напряжения, что приводит к сколам кристаллов на последующих технологических операциях и испытаниях, а также к снижению надежности приборов. Установлено, что основными причинами, приводящими к снижению выхода годных изделий, являются: отслаивание кристаллов из-за неполного образования эвтектики по всей площади, образование микро-

трещин и растрескивание кристаллов после термокомпрессионной разварки выводов.

Процессы бесфлюсовой пайки наиболее важны при сборке электронных устройств и приборов, где требуется исключить применение флюсов, поскольку продукты их разложения способствуют развитию коррозионных процессов, при этом ухудшаются рабочие характеристики полупроводниковых приборов и интегральных схем, снижаются надежность и долговечность электронной аппаратуры. При пайке кремниевых кристаллов интегральных микросхем удаляют оксидные пленки за счет вибраций одной из соединяемых деталей, преимущественно верхней, а вторая остается неподвижной в течение всего процесса. При этом происходит вытеснение припоя за пределы кристалла, увеличивается время монтажа.

Применение ультразвуковых (УЗ) колебаний частотой 50–60 кГц позволяет полностью отказаться от применения флюсов, при этом исключается операция отмычки флюса, сокращается общая длительность технологического процесса монтажа микроплаты. При прохождении упругих колебаний УЗ частоты через расплав припоя в нем возникает кавитация и микропотоки, что и обеспечивает разрушение оксидных пленок и полное смачивание припоем соединяемых поверхностей [2].

При использовании УЗ колебаний для пайки кристаллов возникают определенные трудности, связанные с выбором частоты и амплитуды колебаний, устранением механического воздействия на кристаллы, дозированием припоя и др. Проведено моделирование механических напряжений, возникающих в кристаллах интегральных микросхем при УЗ монтаже на подложку (рисунок 1).

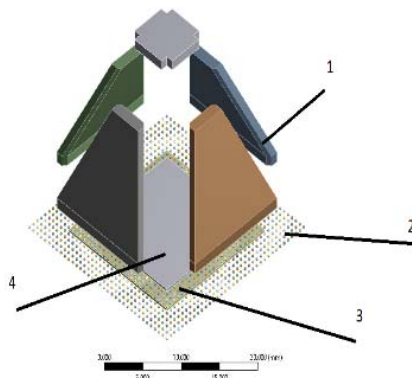


Рисунок 1 – Физическая модель монтажа кристаллов: 1 – захваты; 2 – подложка; 3 – легкоплавкий припой; 4 – кристалл

Подложка и чип изготовлены из кремния, захваты из титанового сплава ВТ2. Конечно-элементная сетка в области кристалла и подложки состоит из гекса-элементов второго порядка. На захватах построена тера-сетка второго порядка. Средний размер элемента в модели составляет 7,8 мкм.

Задача разделена на 2 этапа. Сначала определены температурные поля при пайке, которые затем передаются в прочностной анализ для оценки термомеханических напряжений. Предполагается, что вся сборка в данном случае разогрета до температуры в 240 °С.

Проведено параметрическое исследование влияния переменных факторов на напряжения в кристалле: частота 60–140 кГц, амплитуда УЗ колебаний 0,8–1,5 мкм, размеры кристалла от 1×1 до 20×20 мм², толщина кристалла: 0,05–0,25 мм, усилие на кристалл: 30–150 Н. На рисунке 2 показана эпюра механических напряжений в кристалле при следующих параметрах: частота – 60 кГц, амплитуда – 1,5 мкм, усилие – 100 Н, размеры кристалла – 15×15 мм², толщина – 0,25 мм.

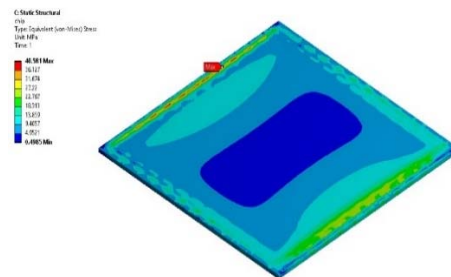


Рисунок 2 – Эпюра механических напряжений в кристалле

Параметрическое исследование зависимости максимальных эквивалентных напряжений в кристалле, где варьировались различные параметры при прочих постоянных представлено на рисунках 3–5.

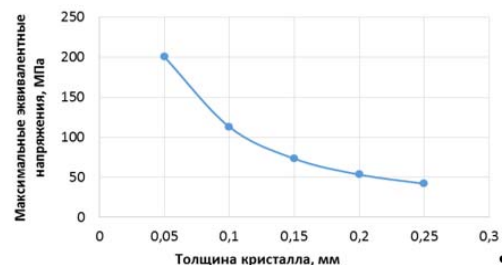


Рисунок 3 – Зависимость эквивалентных напряжений от толщины кристалла

В большинстве рабочих режимов монтажа разрушения изделия не произойдет. Установлены критические режимы, при которых возможно возникновения брака, связанного с повреждением кристалла при механических напряжениях в нем порядка 200–250 МПа.

Для снижения знакопеременных механических напряжений в кристаллах амплитуду колебаний A необходимо снижать, однако для сохранения необходимого уровня энергии повысить частоту согласно выражению:

$$E = \frac{\rho \cdot V (A \cdot \omega)^2}{2},$$

где ρ – плотность металла, V – объем соединения.

Фторполимер существует в четырех возможных конформациях (α -, β -, γ -, δ -фазы) (рисунок 4, а и б).

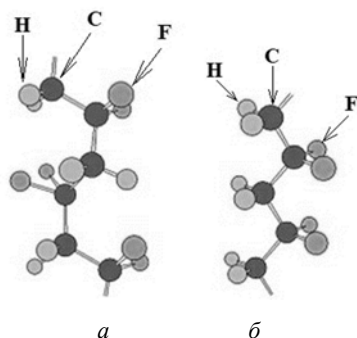


Рисунок 4 – а – α -фаза ПВДФ; б – β -фаза ПВДФ

Связи $C-F$ являются полярными, и максимальный дипольный момент достигается в том случае, если все диполи полимерной молекулы располагаются в одном и том же направлении. Эта структура соответствует β -фазе ПВДФ. Оптимальные пьезоэлектрические характеристики полимера достигаются в том случае, если он содержит β -фазу.

Характерной особенностью поливинилиденфторида является кристаллический полиморфизм, связанный со способностью каждой конформации макромолекулы кристаллизоваться в собственной ячейке со своими параметрами.

На основе поливинилиденфторида разработаны высокоэффективные пьезоэлектрики конкурентоспособные с пьезокерамикой. Поливинилиденфторид и сополимеры винилиденфторида с другими мономерами обладают сегнетоэлектрическими свойствами – способны к переполяризации, гистерезисными зависимостями поляризации от напряженности поля и температурой Кюри.

ПВДФ обладает:

- хорошей механической, химической и физической устойчивостью;
- высоким электрическим сопротивлением и хорошо противостоит воздействию пламени, тем самым может служить материалом для изоляции электрических проводов;
- высокой механической прочностью;
- износостойкостью;
- атмосферостойкостью;
- стойкостью к воздействию ультрафиолетовых лучей;
- стойкостью к ионизирующему излучению;

– стойкостью к действию минеральных кислот (за исключением дымящей серной, щелочей, галогенов и углеводов) [2].

Благодаря тому, что фторполимер имеет высокую степень чистоты и обладает хорошими эксплуатационными характеристиками, ПВДФ является альтернативой многим металлическим материалам, который находит применение во многих отраслях: нефтяной, химической, металлургической, пищевой, целлюлозно-бумажной, текстильной, полупроводниковой, фармацевтической и атомной. А также применяется в качестве материала для оболочки в кабелях (рисунок 5) [3].

ПВДФ начали использовать и в новых сферах:

- в производстве мембран;
- в производстве компонентов интерьера самолетов и офисного оборудования.

Мембраны из ПВДФ характеризуются высокой скоростью потока и пропускной способностью и могут применяться в качестве сепараторов в литий-ионных батареях, для микрофльтрации агрессивных неорганических жидкостей и растворов, поскольку они обладают хорошей химической стойкостью и термостойкостью.



Рисунок 5 – Применение ПВДФ

Литература

1. Минскер К.С. Старение и стабилизация полимеров на основе винилхлорида / К.С. Минскер, С.В. Колесов, Г.Е. Заиков – М., Химия, 1982. – 272 с.
2. MPlast [Электронный ресурс] – Режим доступа : <https://mplast.by/>. Дата доступа – 30.09.2020.
3. PLASEINFO – Режим доступа: [heeps://plaseinfo.ru/](https://plaseinfo.ru/). – Дата доступа: 30.09.2020.

МЭМС-ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ Николаева Т.А., Таратын И.А., Плескачевский Ю.М.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

МЭМС (микроэлектромеханические системы) – устройства, объединяющие в себе микроэлектронные и микромеханические компоненты. МЭМС-датчики давления моделируют процессы, параметры которых регистрирует микромеханическая структура.

Современный датчик должен иметь:

- малые габариты;
- малую массу;
- высокую чувствительность;
- хорошую температурную стабильность;
- возможность предоставления выходной информации в цифровом виде.

На базе МЭМС производят акселерометры, гироскопы, датчики давления, микрозеркала, оптические переключатели, биомикросистемы и другие изделия.

Давление – один из основных физических параметров, который тесно связан с жизнью и производством.

Для измерения давления разработано много подходов. Датчик давления – устройство, физические параметры которого изменяются в зависимости от давления измеряемой среды. В таких датчиках давление измеряемой среды преобразуется в унифицированный пневматический, электрический сигналы или цифровой код [1-3].

Датчик дифференциального давления представляет собой микросистему, объединяющую два компонента:

1. Исполнительный на отдельном кристалле измерительный элемент (рисунок 1), который преобразует контролируемые параметры физической среды в некоторый электрический сигнал;

2. Специализированная интегральная микросхема, которая осуществляет обработку входного и формирования выходного сигнала, содержащего информацию об измеряемом параметре.

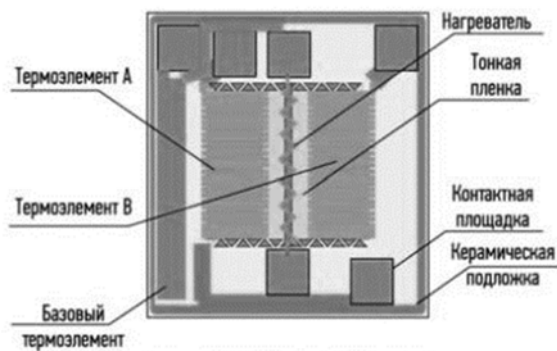


Рисунок 1 – Конструкция измерительного элемента

Принцип измерения дифференциального давления в таком датчике заключается в следующем: при возникновении движения потока воздуха в измерительном элементе, происходит нагрев термозлементов, причём термозлемент В нагревается в большей степени по сравнению с термозлементом А. Следовательно, на выводе элемента В происходит возрастание напряжения, а на выводе элемента А – уменьшение выходного напряжения. Разность напряжений на выводах термозлементов позволяет определить дифференциальное давление в основном канале транспортируемого воздуха [4].

Тензорезистивный датчик давления обычно представляет собой специальную упругую конструкцию с закреплённым на ней тензорезистором и другими вспомогательными деталями.

В тензорезистивных датчиках давления преобразователь обычно монтируется на металлической мембране, где происходит измерение отклонения. Такая конструкция является лучшим решением для приложений с высоким давлением, и чаще всего используется при экстремальном давлении в сотни и тысячи МПа.

Преимущества тензометрических датчиков:

1. Повышенная точность измерения;
2. Сочетаются с измерениями напряжений, не имеют искажений данных измерения;
3. Малые размеры дают возможность применять их в любых измерениях.

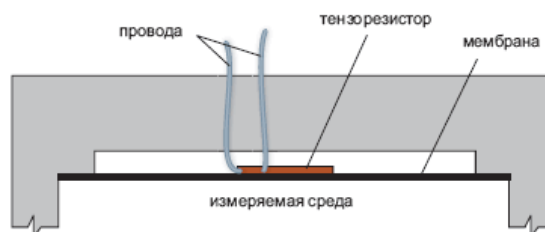


Рисунок 2 – Схема тензодатчика давления

Емкостной датчик давления (рисунок 3) состоит из параллельных пластин – конденсаторов, соединенных с диафрагмой, которая обычно металлическая и подвергается давлению сил участвующих в процессе с одной стороны и опорным давлением на другой стороне. Электроды прикреплены к мембране и получают питание от генератора высокой частоты. Электроды ощущают любое перемещение диафрагмы и это влияет на изменение емкости пластин. Изменение емкости обнаруживается подсоединенной электрической цепью, которая выводит напряжение в соответствии с изменением давления.

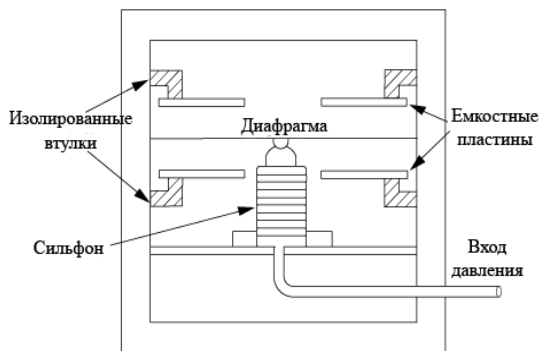


Рисунок 3 – Емкостной датчик давления

Емкостные МЭМС датчики давления отличаются высокой термостабильностью и хорошей временной стабильностью рабочих характеристик. Емкостные МЭМС-датчики давления демонстрируют уникальную точность, надежность и стабильность измерений, при высокой чувствительности к измеряемому параметру [5].

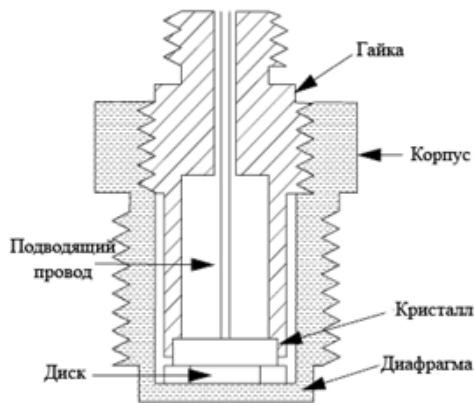


Рисунок 4 – Пьезоэлектрический датчик давления

Принцип действия пьезоэлектрических МЭМС-датчиков давления заключается в следующем: когда давление прикладывается к кристаллу, он деформируется и создается небольшой электрический заряд. Измерение этого электрического заряда пропорционально изменению давления. Этот тип датчика имеет очень быстрое время отклика на постоянные изменения давления.

УДК 621.396

ТЕХНОЛОГИЯ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ НАИХУДШЕГО СЛУЧАЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Орлов Е.Е., Малый С.В.

*Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

При решении задач электромагнитной совместимости необходимо учитывать невозможность получить точные значения ряда параметров, а также возможный разброс других параметров из-за, например, условий эксплуатации анализируе-

мых систем. Чтобы гарантировать работоспособность анализируемой системы, расчет электромагнитных полей для решения задач электромагнитной совместимости должен происходить в предположении наихудшего случая: принимает-

К достоинствам пьезоэлектрического датчика можно отнести его дешевизну, простоту в изготовлении и использовании.

В таких датчиках нужно учитывать влияние обратного пьезоэффекта. Если к пьезодатчику прикладывается электрический потенциал, то поляризация пьезоэлектрика во внешнем электрическом поле влияет на изменение его размеров и механическое воздействие на окружение.

Пьезоэлектрические датчики целесообразно применять при измерении быстроменяющегося давления.

Есть и другие типы датчиков давления, которые можно использовать. Например, можно создать механическую структуру с резонансной частотой, которая является функцией приложенного давления. Подается сигнал, вызывающий вибрацию конструкции, и измеряется изменение резонансной частоты. Такие устройства могут быть очень точными, но их сложно изготавливать и они чувствительны к другим факторам окружающей среды, таким как температура, которые также изменяют резонансную частоту [6].

Исходя из вышеизложенного можно сказать, что емкостные датчики давления в большей мере подходят для измерения параметров воздушных сред.

Литература

1. Mukhopadhyay S.C. Wearable Sensors for Human Activity Monitoring: A Review. / S.C. Mukhopadhyay. – IEEE Sens. J. 2014, № 15, 1321–1330 p.
2. Lee J.O. A microscale optical implant for continuous in vivo monitoring of intraocular pressure. / J.O. Lee, H. Park; J. Du, A. Balakrishna, O. Chen, D. Sretavan, H. Choo. – Microsyst. Nanoeng, 2017, 3, 17057.
3. Wu N.A miniature fiber optic blood pressure sensor and its application in in vivo blood pressure measurements of a swine model / N. Wu, Y. Tian, X. Zou, Y/ Zhai; K. Barringhaus; X. Wang. – Sens. Actuators B Chem., 2013, 181. – Pp. 172–178.
4. PT ELECTRONICS. – Режим доступа: <https://ptelectronics.ru/>. – Дата доступа: 30.09.2020.
5. Фрайден Дж. Современные датчики / Дж. Фрайден. – Москва: Техносфера, 2005. – 592 с.
6. AVNET ABACUS. – Режим доступа: <https://www.avnet.com/>. – Дата доступа: 30.09.2020.

ся, что параметры, значение которых неизвестно, максимизируют амплитуду электромагнитного поля в точках наблюдения. Не всегда можно предсказать значение параметра, при котором амплитуда электромагнитного поля в точке наблюдения будет максимальной. В частности, полученное распределение электромагнитного поля может быть изрезано интерференционными эффектами. Изрезанность поля делает результат расчета неустойчивым, поскольку малые изменения значений параметров расчета могут привести к большим изменениям вычисленного значения амплитуды электромагнитного поля.

Рассмотреть наихудший случай методами вычислительной электродинамики можно статистическими подходами, например, с помощью метода Монте-Карло, но в этом случае требуется проведение множества повторяющихся расчетов (итераций) и, соответственно, большие вычислительные ресурсы. Аналитические модели электродинамики дают возможность быстро решать ряд задач (в том числе и на высоких частотах), однако рассчитанное электромагнитное поле также является изрезанным. Для устранения изрезанности рассчитанного поля на высоких частотах может также использоваться статистический подход, однако он является вычислительно затратным даже в том случае, когда на каждой итерации используется аналитическая модель электродинамики. Другой подход заключается в разработке специальных моделей наихудшего случая (см., например, модель излучения провода [1]).

Поскольку аналитические модели применимы только для ограниченного числа простейших задач, актуальной является задача совместного использования методов вычислительной электродинамики и аналитических моделей наихудшего случая при оценке электромагнитной совместимости элементов радиоэлектронных систем.

Общий принцип решения данной задачи состоит в (рисунок 1):

1. Задании пространственной области V , для расчета которой с заданной точностью не имеется аналитической модели наихудшего случая;

2. Выделении замкнутой поверхности S , полностью окруженной однородной диэлектрической средой и охватывающей источник излучения;

3. Расчете распределения ЭМ поля на поверхности S с использованием аналитической модели наихудшего случая;

4. Расчете распределения ЭМ поля в объеме V от эквивалентных источников на поверхности S с использованием метода вычислительной электродинамики с последующей обработкой.

В качестве гибридного метода вычислительной электродинамики используется метод минимальных автономных блоков (МАБ) [2], имеющий ряд преимуществ перед другими методами вычислительной электродинамики (удобство

объединения с другими методами благодаря работе с тангенциальными компонентами элементов плоских волн в качестве источников возбуждения; максимальный размер ячейки сетки, равный $1/4$ длины волны и др.).



Рисунок 1 – Графическая демонстрация предлагаемого принципа объединения аналитических моделей наихудшего случая и метода минимальных автономных блоков

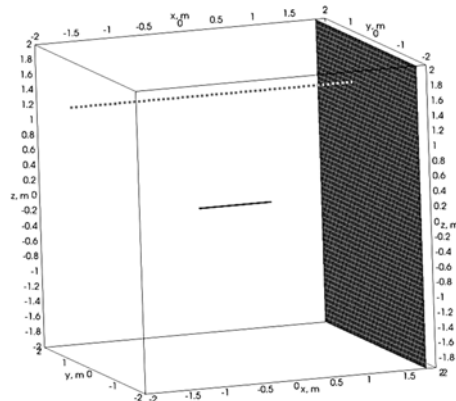


Рисунок 2 – Геометрия тестовой задачи: черными сплошными линиями показаны границы области моделирования, черная поверхность – металлическая стена (моделируется металлизацией каналов МАБ [2]), черная линия посередине – провод, серые точки – точки наблюдения распределения амплитуды электрического поля (рисунок 3)

В рамках моделей наихудшего случая не предсказывается фаза рассчитанных электрического и магнитного полей, только амплитуда. Информация о фазе необходима при задании возбуждения для методов вычислительной электродинамики. Как показали вычислительные эксперименты, следующий принцип позволяет получить приемлемые результаты, не имея информации о фазе возбуждения (т.е. положив ее равной нулю):

Максимально расширять поверхность S , на которой задаются источники. Например, если есть провод (для него разработана аналитическая модель наихудшего случая) рядом с металличе-

ской стеной, то надо возбуждать МАБ полем модели излучения провода наихудшего случая только возле стены, и рассчитывать ЭМ поле в точке наблюдения как сумму поля по аналитической модели провода и поля, рассчитанного методом МАБ (ЭМ поля, отраженного от стены) (рисунок 1).

Применение указанного принципа для тривиальных задач, для которых разработаны аналитические модели наихудшего случая, дает верный результат: поскольку нет объектов, не описываемых аналитической моделью, область S должна распространяться на бесконечность.

Комплексные амплитуды электрического и магнитного полей рассчитываются на основе комплексных амплитуд канальных волн [2]. Для расчета амплитуды электрического и магнитного полей методом МАБ предлагается отбрасывать фазы при амплитудах канальных волн (чтобы уменьшить влияние резонансов).

Для проверки предлагаемой методики произведен расчет распределения амплитуды электрического поля для сегмента провода, расположенного перпендикулярно металлической стенке. Сегмент имеет длину 1 м ($z = 0,01$ м), область расчета V имеет размеры $4 \times 4 \times 4$ м (границы координат по осям: $[-2; 2]$, $[-2, 2]$, $[-2, 2]$ м); Провод расположен вдоль оси x . Координаты центра провода: $(0, 0, 0,01)$ м. Амплитуда тока вдоль провода: 1 мА. Частота расчета: 1 ГГц. Вдоль каждой оси область расчета разбита на 60 блоков МАБ. Результат расчета представлен на рисунке 3. В качестве аналитических моделей («Аналитическая модель» и «Аналитическая модель наихудшего случая») использовались модели излучения одиночного сегмента провода в свободном пространстве, полученные упрощением разработанных ранее моделей для сегмента провода, расположенного параллельно металлической поверхности [1] («Укороченная модель» и «пессимистическая модель», соответственно).

УДК 621.373.52

ОПТИМИЗАЦИЯ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ГЕНЕРАТОРА МИКРОСВАРКИ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 60–140 кГц

Петухов И.Б., Кипарин И.Н.

ОАО «Планар-СО»
Минск, Республика Беларусь

В настоящее время в установках присоединения проволочных и ленточных выводов в изделиях электронной техники используется ультразвуковая или термозвуковая микросварка с резонансной частотой ультразвукового преобразователя (УЗП) в широком диапазоне частот – в основном от 60 до 140 кГц. Известны также конструкции УЗП с двойной резонансной частотой,

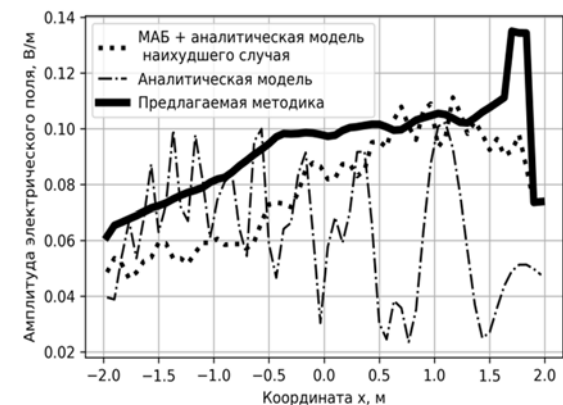


Рисунок 3 – Пространственное распределение амплитуды напряженности электрического поля для тестовой задачи, указанной на рисунке. Координата y равна 0,7 м, координата z равна 1,37 м

Из рисунка 3 видно, что предлагаемый подход позволил получить огибающую для большей части точек наблюдения. Уменьшение амплитуды напряженности электрического поля в области отрицательных значений координаты x предположительно связано с приближением к границе области расчета МАБ.

Предлагаемая методика также проверена на задаче определения амплитуды напряженности электрического поля провода внутри металлического ящика с апертурой. Полученные результаты удовлетворяют требованиям наихудшего случая.

Литература

1. Орлов Е.Е. Вычислительно эффективная широкополосная пессимистическая модель излучения сегмента провода для анализа электромагнитной совместимости / Е.Е. Орлов, Е.В. Синькевич, С.В. Малый // Доклады БГУИР. – 2017. – № 3 (105). – С. 32–39.
2. Никольский В.В. Декомпозиционный подход к задачам электродинамики. – «Наука»: глав. ред. физико-математической литературы, 1983.

той, например, одна резонансная частота в стандартном диапазоне 60 кГц, а вторая – в диапазоне повышенной частоты (≥ 100 кГц) [1]. Это расширяет технологические возможности оборудования монтажа выводов, обеспечивая гибкие режимы микросварки на контактных площадках кристаллов и внешних выводах корпуса или ленточного носителя.

При микросварке проволочных или ленточных выводов подводимая мощность к УЗП зависит от диаметра присоединяемых выводов, импеданса УЗП на резонансной частоте и обычно подразделяется на два диапазона. Для диапазона с диаметром от 17,5 до 80 мкм алюминиевой или золотой проволоки подводимая мощность составляет от 0,5 до 4 Вт при значении импеданса УЗП 15–25 Ом. Для проводников диаметром 100–500 мкм максимальная подводимая мощность ограничивается 30–40 Вт при том же значении импеданса УЗП. Эффективность используемой ультразвуковой системы (УЗС) оценивается в первую очередь точностью подводимой мощности на резонансной частоте УЗП ультразвуковым генератором (УЗГ).

Функцию захвата и удержания резонансной частоты при работе УЗС выполняет система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) УЗГ. Преимущество использования ФАПЧ заключается в ступенчатой характеристике фазового угла между напряжением и током УЗП на резонансной частоте (кривая 2, рисунок 1). Прохождение кривой 2 слева через горизонтальную ось частоты соответствует нулевому фазовому сдвигу между напряжением и током УЗП, при этом импеданс УЗП имеет минимальное значение. Прохождение кривой 2 через ось частоты в точке справа соответствует так называемой точке антирезонанса УЗП, где импеданс УЗП имеет максимальное значение. Разность значений частоты антирезонанса и частоты резонанса определяет электромеханический коэффициент связи (типичное значение находится в диапазоне $0,3 \div 0,38$) [2].

При аппаратной реализации системы ФАПЧ установок проволочного монтажа существуют некоторые особенности. Для эффективной работы системы ФАПЧ как минимум в двухчастотном диапазоне, возможна оптимизация традиционных схемотехнических решений. Структурная схема элементов двухчастотной системы ФАПЧ УЗГ приведена на рисунке 2 [3].

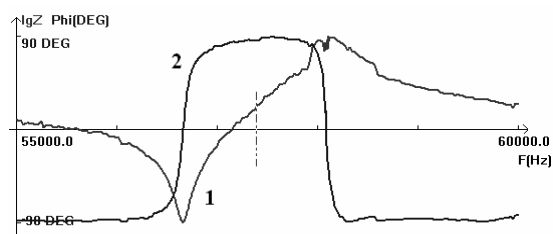


Рисунок 1 – Зависимости импеданса УЗП (1) и фазового угла (2) между напряжением и током от частоты

Фазовращатель 90° и фильтр, как правило, выполняют перестраиваемыми. Недостатком такого решения является необходимость подстройки под резонансную частоту УЗП.

В случае использования широкополосного фазовращателя на 90° недостатком является сложность реализации либо значительное ослабление полезного сигнала с повышением рабочей частоты при реализации в виде интегратора.



Рисунок 2 – Структурная схема элементов двухчастотной системы ФАПЧ УЗГ

Для упрощения конструкции с улучшением функциональности УЗГ реализована схема, представленная на рисунке 3.

Фазовращатель -45° представляет дифференцирующую RC-цепь. Фазовращатель $+45^\circ$ представляет интегрирующую RC-цепь. Постоянные времени дифференцирования и интегрирования равны. Благодаря этому обеспечивается точная разность фаз 90° между выходными сигналами компараторов тока и напряжения в диапазоне рабочих частот.

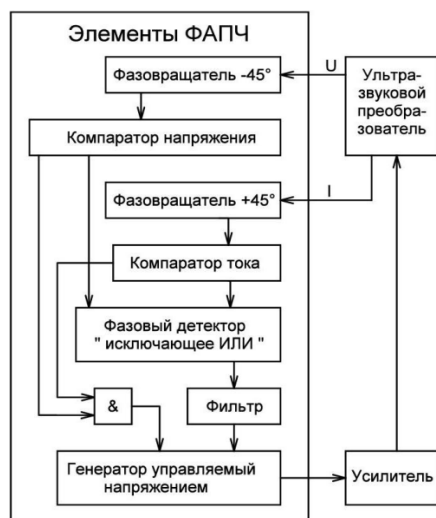


Рисунок 3 – Усовершенствованная схема УЗГ

Для удержания рабочей частоты УЗГ на резонансной частоте УЗП между импульсами сварки по структурной схеме, представленной на рисунке 2, генератор управляемый напряжением (ГУН) на выходе вырабатывает небольшое «дежурное» напряжение, поступающее на вход уси-

лителя. Выходное напряжение с усилителя поступает на УЗП. Напряжение с УЗП преобразуется компаратором напряжения в сигнал формы меандр, который поступает на первый вход фазового детектора «исключающее ИЛИ». Данный тип фазового детектора предполагает разность фаз 90° между сигналами тока и напряжения с выходов компараторов тока и напряжения на резонансной частоте УЗП.

Сигнал тока УЗП проходит через регулируемый фазовращатель, осуществляющий фазовый сдвиг в 90° между сигналами тока и напряжения на рабочей частоте УЗП. Далее компаратор тока преобразует форму сигнала в меандр и этот сигнал поступает на второй вход фазового детектора «исключающее ИЛИ». Сигнал с выхода фазового детектора через фильтр поступает на вход ГУН, удерживая резонансную частоту УЗП. При отклонении фазового сдвига от 90° между сигналами тока и напряжения с выходов компараторов тока и напряжения, системой ФАПЧ вырабатывается сигнал рассогласования, сдвигающий резонансную частоту влево или вправо от точки резонанса УЗП. Это обусловлено фазо-частотной характеристикой УЗП (см. рисунок 1).

При резонансе фазовый детектор «исключающее ИЛИ» вырабатывает сигнал равный середине диапазона ($1/2$ питания фазового детектора). При изменении фазового сдвига, а значит и отклонения частоты от резонанса, на входе ГУН будет присутствовать сигнал рассогласования, который вернет ГУН на частоту резонанса УЗП. Ввиду того, что сигнал рассогласования отклоняется от средней точки фазового детектора в ту или иную сторону, ГУН уменьшает или увеличивает рабочую частоту, приближая ее к резонансной частоте УЗП.

В некоторых случаях, наличие «дежурного» напряжения на УЗП, пусть и небольшого, нежелательно, особенно при присоединении особо тонких проводников (≤ 20 мкм), внося воздействие на поверхность проволоки перед рабочим ультразвуковым импульсом.

Для обеспечения режима работы УЗГ и нормальной работы ФАПЧ без «дежурного» напряжения на УЗП предложена структура усовершенствованной схемы УЗГ согласно рисунку 3.

Основное отличие заключается в использовании двух фазовращателей по 45° свободных от регулировки. Добавлен логический элемент «И», подключенный входами к компараторам, а выходом к ГУН. Благодаря этому удается удерживать частоту ГУН на резонансной частоте УЗП при отсутствии сигналов компаратора напряжения и тока в промежутках между рабочими импульсами. Таким образом реализован режим работы, когда между запусками рабочих импульсов частота ГУН близка или равна частоте резонанса УЗП.

Литература

1. DeAngelis D.A. Ultrasonic transducer for wire bonding and methods of forming wire bonds using ultrasonic transducers / D.A. DeAngelis, G.W. Shulze // Patent US 8.251.275B2. – 28.08.2012. – P.1–22
2. Lin S. Analysis of the sandwich ultrasonic transducer with two sets of piezoelectric elements / S. Lin, C. Xu // Smart materials and structures. – 2008. – № 17. – P. 1–9.
3. Петухов И.Б. Способ формирования синусоидального напряжения на микросхеме DDS AD9833 для системы фазовой автоподстройки частоты / И.Б. Петухов, И.Н. Кипарин // 10-я МНТК «Приборостроение-2017». – 2017. – С. 229–230.

УДК 53.082.78

КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ТРИБОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ

Пилько В.В. (ст.), Пилько В.В.

*Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Как правило, первостепенными требованиями для трибосопряжений являются низкий коэффициент трения, высокая микротвердость и устойчивость к износу. Предшествующими исследованиями [1–3] было показано, что состав, структура и свойства металлов и сплавов на их основе могут быть эффективно модифицированы с помощью ионной имплантации по методу [2], либо путем нанесения покрытий [3]. Намечившиеся в последнее время тенденции широкого использования наноразмерных структур вынуждают повышать локальность методов измерения трибопараметров как по поверхности, так и по глубине

материала. Первым важным шагом для решения проблемы представляется унификация требований к испытываемым образцам и контртелу. С этой целью авторами было разработано специализированное устройство [4], прототипом которого послужило устройство для измерения коэффициента трения методом «плоскость на диске» [5]. При разработке новой системы основное внимание было уделено расширению возможностей метода [4].

Методика и обсуждение результатов. Установлено, что для решения поставленных задач одним из наиболее эффективных методов иссле-

дования коэффициента трения и износостойкости является трибосопряжение полированного ребра вращающегося диска, изготовленного из нержавеющей стали 12Х18Н9Т (контртело) и плоскости (образец) при сохранении неизменными основных параметров испытаний и положения пятна контакта. Измерение коэффициента трения реализуется с повышенной точностью и локальностью за счет жесткого фиксирования пятна контакта на образце при любых изменениях коэффициента трения в процессе испытаний. Участок образца, подвергаемый трению и износу, не смещается, трение постоянно происходит на ювенильной поверхности образца, и коэффициент трения характеризует взаимодействие между контртелом и материалом, не подвергнутым воздействию среды. В результате применения устройства осцилляции величины силы трения, обусловленные смещением пятна контакта, устраняются, и, при неизменных характеристиках регистрирующего прибора, повышается соотношение сигнал/шум. Это увеличивает точность измерений, позволяет снижать испытательные нагрузки и подвергать исследованию поверхностные слои микронной и субмикронной толщины с высокой локальностью измерений, как по глубине слоя, так и по его поверхности.

Основной проблемой устройств класса [4] является наличие жесткой механической связи приводного вала с нагрузочным валом, вызывающей в ряде случаев повреждение привода при избыточных нагрузках. Эту проблему удалось преодолеть путем использования методики бесконтактной передачи и измерения крутящего момента. Особое внимание было посвящено также вопросам повышения помехоустойчивости и снижения температурного дрейфа измерительной системы. С этой целью в разработанном устройстве в качестве деформируемого связующего элемента использовано поле постоянных магнитов по схеме, представленной на рисунке 1.

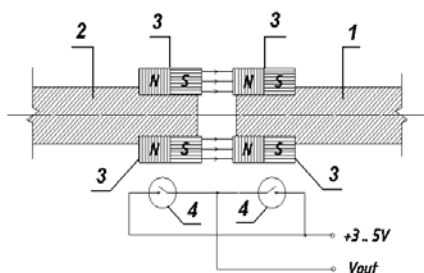


Рисунок 1 – Схематическое изображение устройства для бесконтактной передачи и измерения крутящего момента:

1 – приводной вал; 2 – нагрузочный вал;
3 – постоянные магниты; 4 – герметичные контакты

Как видно из схемы, в случае холостого хода нагрузочного вала длительность сигнала высокого уровня на выходе минимальна и может быть

определена с помощью таймера. При возникновении на нагрузочном валу крутящего момента поле постоянных магнитов деформируется и возникает отличный от нуля угол запаздывания нагрузочного вала относительно приводного вала. Продолжительность сигнала высокого уровня на выходе схемы ИЛИ, построенной на основе герконов, увеличивается. При этом измерительная система не связана механически с узлами, подверженными разогреву и ее температурный дрейф незначителен. Одновременно, благодаря наличию электромеханической развязки в устройстве может быть реализована полная герметизация нагрузочного вала.

Для проведения измерений испытуемый узел трения присоединяют к нагрузочному валу, затем придают вращение приводному валу и регистрируют длительность сигнала высокого уровня T . При неизменных условиях испытаний длительность сигнала холостого хода t известна, и программным методом рассчитывается приращение длительности сигнала высокого уровня $D = T - t$. По известной калибровочной зависимости приращения D от крутящего момента M программным методом определяют значение крутящего момента и рассчитывают коэффициент трения. Регистрация и обработка данных производится с помощью специально разработанного программно-аппаратного комплекса, совместимого как с интерфейсными устройствами на базе *PIO 821h*, так и с микропроцессорами *ATmega 328*. Программное обеспечение *TriboTest 2.2* обладает дружественным интерфейсом, совместимым с версиями операционных систем от *Windows XP* до *Windows 7*.

Ниже, в качестве примера, приводятся результаты исследования основных трибологических свойств ряда перспективных структур при использовании в качестве контртела диска из нержавеющей стали 12Х18Н9Т. Типичный результат измерений коэффициента «сухого» трения по усовершенствованному методу [4] представлен на рисунке 2. Нагрузка на образец во всех опытах сохранялась равной 0,2 Н.

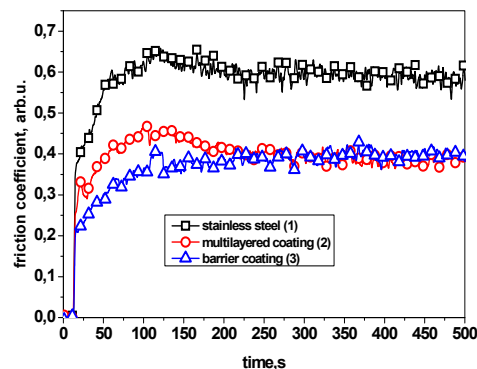


Рисунок 2 – Коэффициент «сухого» трения в зависимости от времени испытаний:
1 – исходный образец нержавеющей стали;
2 и 3 – сталь с покрытием

В качестве примера на рисунке 2 представлены зависимости коэффициента трения от времени, полученные в процессе испытаний двух новых типов покрытия: многослойного (16 слоев) с периодом Ti/TiN (кривая 2) и покрытия Ti–Al–N/Ti–Al (кривая 3), служащего эффективным барьером для диффузии водорода в атомной энергетике. Показано, что при нанесении покрытий снижение коэффициента трения скольжения может составлять от 30 до 40 %.

На трибограмме исходного состояния заметны выбросы, свидетельствующие о когезионных процессах, в то время как защищенный покрытием материал не склонен к налипанию. Отметим, что при неизменных условиях испытаний вслед за измерением коэффициента трения может быть определена износостойкость трибосопряжения путем измерения протяженности сформировавшегося трека износа. Как показали микроскопические исследования, трек износа исходного образца содержит ярко выраженные следы когезионных процессов и имеет большую протяженность. Для образцов, защищенных покрытиями поверхность трека износа близка к зеркальной, а длина трека существенно сократилась. Подавление когезионных процессов сопровождалось существенным увеличением износостойкости трибосопряжений, наиболее выра-

женным для случая многослойного покрытия. Увеличение износостойкости при нанесении защитных слоев составило от 150 до 200 % для слоев 2 и 3, соответственно.

Литература

1. Borets A.A. Structure and phase transformations in chemical active ions bombarded thin Al films / A.A. Borets, F.F. Komarov, V.V. Pilko, S.J. Shiryajev // *Radiation Effects Letters*. – 1986, v. 87, № 4. – Pp. 163–168.
2. Katsapov A.N. Metals and alloys surface hardening method / A.N. Katsapov, F.F. Komarov, V.V. Pilko, A.A. Pugatshov // *USSR Patent*. №166395, 30.11.1988.
3. Klimovich I.M. Influence of Parameters of Reactive Magnetron Sputtering on Tribomechanical Properties of Protective Nanostructured Ti-Al-C-N coatings / I.M. Klimovich, F.F. Komarov, V.A. Zaikov, A.R. Kuleshov, V.V. Pilko // *Journal of Friction and Wear*. – 2018. – Vol. 39, No. 2. – P. 92–98.
4. Комаров Ф.Ф. Программно-аппаратный комплекс для исследования процессов трения и износа методом «диск на плоскости» Ф.Ф. Комаров, В.В. Пилько, В.Н. Кулешов // *Приборы и методы измерений*. – 2016. – Т. 7, № 3. – С. 122–128.
5. Пилько В.В. Устройство для измерения коэффициента трения поверхностных слоев / Пилько В.В., Пилько В.В.(мл.) // Положительное решение на выдачу патента РБ №20190292 от 27.03.2020 г. – С. 1–6.

УДК 535.421

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОННЫХ НАНОСТРУЙ В ДИФРАКЦИОННЫХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЯХ ИЗОЛИРОВАННЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ Полещук Н.Н., Рудницкий А.С.

*Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

В дифракционных полях изолированных диэлектрических частиц с размерами порядка длины волны формируются вблизи их поверхности области повышенной интенсивности волнового поля, получившие название фотонных наноструй (ФНС). Особенность ФНС заключается в высокой пространственной локализации светового поля в поперечном к направлению падающего излучения сечении, что приводит к субволновым размерам фотонного потока. Эта особенность ФНС и представляет интерес для практического применения их в нанопотонике, биологии, медицине, нанозлектронике, системах хранения данных. Сообщается о возможности разработки устройств хранения данных с ультравысокой плотностью записи информации и технологии безмасочного (прямого) нанесения шаблонов на поверхность фотосенсоров [1]. На эффект формирования фотонных наноструй (ФНС) впервые было обращено внимание в работе [2] при изучении пространственной структуры ближнего поля рассеяния светового пучка на прозрачном квар-

цевом цилиндре микронных размеров. Большинство известных теоретических результатов относятся к цилиндрическим и сферическим частицам и получены на основе соответствующих аналитических решений дифракционных задач. В работе [3] на их основе показано, что, варьируя оптический контраст оболочек сферической частицы, можно управлять параметрами ФНС. При исследовании фотонных наноструй на частицах более сложной формы используются численные методы. В работе [4] приведены примеры численного моделирования фотонных наноструй на частицах в виде осесимметричного конуса, пирамиды, бруска с треугольным профилем. Моделирование проводилось на коммерческом программном продукте CST Microwave Studio.

В работе [5] исследованы фотонные наноструи, сформированные квадратными микроступеньками на кварцевой подложке. Достаточно полный обзор работ, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям эффектов ФНС, можно найти в работе [6–8].

В данной работе рассматривается пошаговое улучшение параметров ФНС не только посредством изменения физических свойств частицы, но и свойств экспонирующего поля на примере двумерной задачи дифракции волнового поля на диэлектрическом цилиндре квадратного сечения. Диэлектрическая проницаемость материала цилиндра равна 2, а для окружающей среды 1. Размеры сечения в длинах волн равны $1 \leq x \leq 2, 1 \leq z \leq 2$. Исходное интегральное уравнение представим в виде:

$$u(r) = u_0(r) + \int_S u(r') K(r, r') dr', \quad (1)$$

$$K(r, r') = -0,25k^2(\varepsilon - 1) i H_0^{(2)}(k|r - r'|).$$

Приближенное решение ищем в виде линейной комбинации базисных функций:

$$u(r') = \sum_{n=1}^N c_n \psi_n(r'). \quad (2)$$

В качестве базисных функций выбирается система характеристических функций Хаара. Чтобы ввести их, разобьем область поперечного сечения S на N непересекающихся множеств S_n . Тогда базисная функция полагается равной единице, если переменная интегрирования принадлежит области S_n , и равной нулю, если не принадлежит. Система уравнений для определения коэффициентов C_n принимает в этом случае вид:

$$\sum_{n=1}^N c_n A_{mn} = u_{0m}, \quad (3)$$

$$A_{mn} = \delta_{mn} + \int_{S_n} K(r, r') dr' \quad (4)$$

На основе строгого решения двумерной задачи дифракции плоской волны на диэлектрическом цилиндре исследована зависимость распределения интенсивности дифракционного волнового поля в ближней зоне дифракции от направления распространения падающей волны, формы поперечного сечения и показателя преломления цилиндра. Установлено, что при распространении экспонирующей плоской волны по диагонали квадратной частицы с диэлектрической проницаемостью равной 2 и с размерами порядка длины волны область повышенной интенсивности волнового поля формируется вблизи вершины угла с внешней стороны поверхности, то есть на острие поверхности. Такая локализация фотонных наноструй может быть желательной, например, при использовании их в сенсорных устройствах ближнепольной сканирующей оптической микроскопии (БСОМ). Максимальное превышение интенсивности падающей волны равно примерно четырем. Рассмотрены различные способы оптимизации такого типа устройств. Показано, что при неболь-

шом отклонении формы частицы от правильной наблюдается уменьшение поперечного размера фотонных наноструй (ФНС). Дополнительные возможности для улучшения параметров ФНС появляются при экспонировании диэлектрических частиц не плоской волной, а суперпозицией плоских волн:

$$u_0(x, z) = A_1 u_1(x, z) + A_2 u_2(x, z),$$

$$u_1(x, z) = \exp[-ikx(\cos(\theta - \gamma) + z \sin(\theta - \gamma))], \quad (5)$$

$$u_2(x, z) = \exp[-ikx(\cos(\theta + \gamma) + z \sin(\theta + \gamma))].$$

В случае равенства амплитуд суперпозиция волн принимает вид бегущей под углом θ к оси x волны с периодически изменяющейся в ортогональном направлении амплитудой.

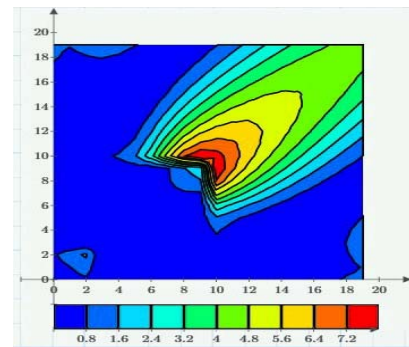
Взаимосвязь между угловым параметром γ и нормированной на длину волны шириной интерференционных полос d определяется соотношением

$$d = 1/2 \sin \gamma. \quad (6)$$

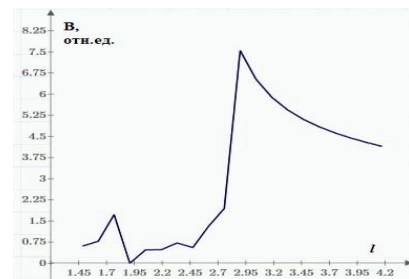
На рисунке 1 представлены двумерные распределения относительной интенсивности дифракционного волнового поля

$$B(x, z) = |u(x, z)|^2 / |u_0(0, 0)|^2 \quad (7)$$

внутри частицы и вне на расстоянии длины волны от поверхности, а также на нормированной на длину волны диагонали l при $\theta = \pi/4, \gamma = \pi/8$.



a



б

Рисунок 1 – Двумерное (а) и диагональное (б) распределения нормированной интенсивности дифракционного волнового поля внутри и в ближней зоне частицы

Как показано на рисунке 1, пиковая интенсивность ФНС превышает интенсивность падающего поля более чем в семь раз.

Таким образом, посредством выбора структуры экспонирующего волнового поля достигается улучшение параметров ФНС.

Литература

1. Соифер В.А. Дифракционная нанофотоника и перспективные информационные технологии / В.А. Соифер // Вестн. РАН. – 2014. – Т. 84, № 1. – С. 11–22.

2. Chen Z. Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles / Z. Chen, A. Taflove, V. Backman // Optics Express. – 2004. – № 12(7). – P. 1214–1220.

3. Гейнц Ю.Э. Эффект фотонных наноструй в многослойных микронных сферических частицах / Ю.Э. Гейнц, А.А. Землянов, Е.К. Панина // Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41, № 6. – С. 520–525.

4. Минин И.В. Фотоника изолированных диэлектрических частиц произвольной трехмерной формы – новое направление оптических информационных технологий / И.В. Минин, О.В. Минин // Вестник Новосибир. гос. ун-та. – 2014. – Т. 12, вып. 4. – С. 59–70.

5. Котляр В.В. Фотонные струи, сформированные квадратными микроступеньками / В.В. Котляр, С.С. Стафеев, А.Ю. Фельдман // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 1. – С. 72–80.

6. Heifetz A. Photonic Nanojets / A. Heifetz, S.-C. Kong, A.V. Sahakiana, A. Taflove, V. Backman // J. Comput. Theor. Nanosci. – 2009. – V.6, № 9. – P. 1979–1992.

7. Chen Z. Optical analysis of nanoparticles via enhanced backscattering facilitated by 3-D photonic nanojets / Z. Chen, A. Taflove, V. Backman // Optics Express. – 2005. – № 13(2). – P. 526–533.

8. Kong S.-C. Robust detection of deeply subwavelength pits in simulated optical data-storage disks using photonic jets / S.-C. Kong, A. Sahakian, A. Heifetz, A. Taflove, V. Backman // Appl. Phys. Lett. – 2008. – V. 92. – P. 211102.

УДК 673.2.082

ФОТОПРОВОДИМОСТЬ НИЗКОЭНЕРГОПОТРЕБЛЯЮЩИХ СЕНСОРОВ С ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ СЛОЯМИ $\text{In}_2\text{O}_3 - \text{SnO}_2$

Реутская О.Г.¹, Таратын И.А.²

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²ОАО «Минский НИИ радиоматериалов»
Минск, Республика Беларусь

Физико-химические процессы, происходящие в полупроводниковых сенсорах обусловлены конструктивными особенностями и составом газочувствительных слоев на их поверхности. Выбор такого слоя обеспечивает стабильный и избирательный сигнал при определении горючих и токсичных газов. Для обеспечения развитой сенсорной поверхности широко используются полупроводниковые нанодисперсные материалы, полученные золь-гель методом. Высокую чувствительность к NO_2 позволяют достигать слои на основе оксида олова. Ввиду свойств полупроводниковых материалов в газовых сенсорах наблюдается эффект фотопроводимости, который обеспечивается механизмами рекомбинации зарядов в приповерхностных слоях при воздействии светового излучения [1].

В данной работе представлены результаты изучения фотопроводимости сенсорных устройств при энергопотреблении от 1 до 10 мВт. Также проведено исследование температуры поверхности сенсора и установлена высокая чувствительность газочувствительного слоя $\text{In}_2\text{O}_3 - \text{SnO}_2$.

Для проведения экспериментов был выбран сенсор на подложке из пористого оксида алюминия толщиной 55–60 мкм. Фотографическое изображение сенсора в корпусе без газопроницаемого колпака представлено на рисунке 1.

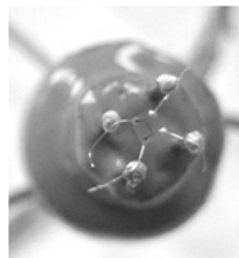


Рисунок 1 – Изображение сенсора без газопроницаемого колпака

Размер чувствительного элемента – $1,25 \times 1,25 \text{ мм}^2$. Нагреватель и информационные электроды располагаются на разных сторонах подложки. Формирование топологии сенсорного устройства осуществлялось с использованием технологических процессов фотолитографии, что позволило получить нагреватель шириной 7 мкм. Применение пористой алюмооксидной подложки предназначено для снижения энергопотребления сенсорного устройства до 10 мВт.

В качестве газочувствительного слоя был выбран золь-гель на основе оксидов индия и олова. На поверхность сформированного слоя наносилась капля содержащая углеродные нанотрубки. Было установлено, что при воздействии светового потока от лампы дневного света наблюдается изменение электросопротивления сенсора.

Особый интерес представляет измерение выходных характеристик сенсора при энергопотреблении менее 10 мВт [2].

На рисунке 2 представлена зависимость электросопротивления сенсора с потребляемой мощностью 1,2 мВт при воздействии дневного света на поверхность сенсора.

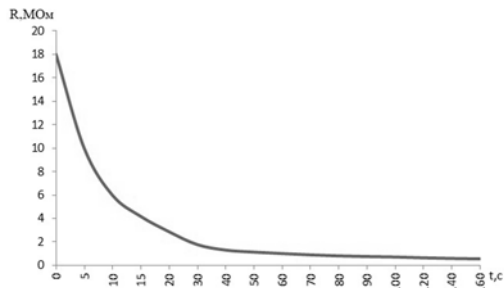


Рисунок 2 – Зависимость электросопротивления от времени при воздействии света ($P = 1,2$ мВт)

Как видно из рисунка 2 наблюдается значительное изменение электросопротивления. В течение 160 с происходит стабилизация значения R , при чем оно не превышает 700 кОм. Что позволяет проводить измерение газовой чувствительности сенсора при низком энергопотреблении.

Для определения влияния потребляемой мощности и освещения на выходные характеристики сенсоров были проведены измерения электросопротивления при потребляемой мощности 7,8 мВт. Результаты исследования представлены на рисунке 3.

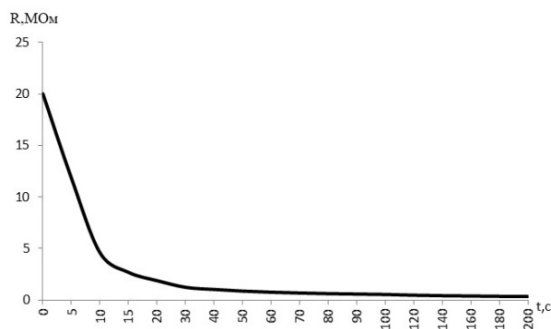


Рисунок 3 – Зависимость электросопротивления от времени при воздействии света ($P = 7,8$ мВт)

Как видно из рисунка 3 при увеличении мощности также наблюдается изменение электросопротивления. Значение R уменьшается, и стабилизация сигнала происходит за время 200 с. Следует отметить, что с увеличением потребляемой мощности до 14 мВт влияние светового потока и как следствие проявление эффекта фотопроводимости более значимо, что отражается на выходном сигнале сенсорного устройства. Для уменьшения влияния освещения в полупроводниковых датчиках чаще всего применяют газопроницаемые колпаки с мелкой сеткой или из прессованных материалов, например, оксида титана.

В свою очередь эффект фотопроводимости можно применять для снижения потребляемой мощности сенсоров, а также при обработке выходных сигналов газовых датчиков [1].

Результаты зависимости потребляемой мощности от температуры поверхности сенсора представлены на рисунке 4.

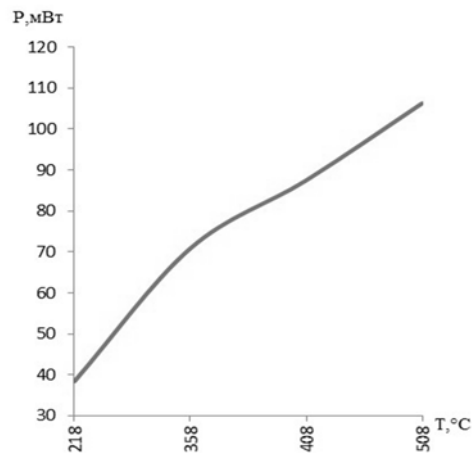


Рисунок 4 – Зависимость потребляемой мощности от температуры нагрева газочувствительного слоя

С увеличением потребляемой мощности более 30 мВт влияние светового потока на данной конструкции не оказало существенного влияния на измеряемое электросопротивления, что может быть связано с температурой нагрева газочувствительной поверхности сенсора. Установлено, что с газочувствительным слоем $\text{In}_2\text{O}_3 - \text{SnO}_2$ с добавлением углеродных нанотрубок рабочий диапазон температур 200–400 °C достижим при мощности 35–80 мВт. Выбор режима измерения определяется видом детектируемого газа и чувствительностью сенсора к нему. Сенсор с данным газочувствительным слоем показал высокую чувствительность (более 50 %) после 20 с от начала измерения с потребляемой мощностью 35 мВт при воздействии NO_2 (концентрация 2 ppm) и быстрое время восстановления электросопротивления после отмены подачи газа на него. Результаты измерения выходного сигнала представлены на рисунке 5.

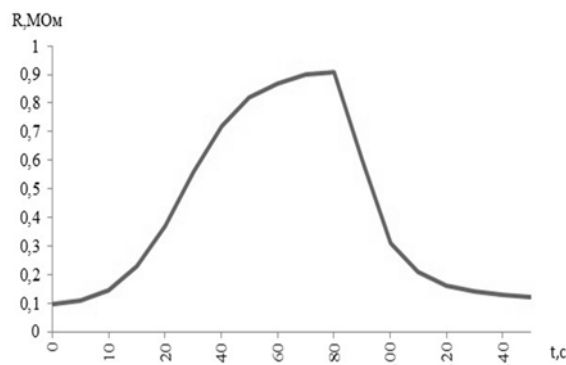


Рисунок 5 – Изменение электросопротивления при воздействии NO_2 с концентрацией 2 ppm

Процессы фотопроводимости в полупроводниковых сенсорах позволяют дополнительно регулировать изменение выходных характеристик, что следует учитывать при выборе режимов обработки данных, поступающих от газовых датчиков. Применение золь-гелей на основе оксидов индия и олова с добавлением углеродных нанотрубок показывают высокий сенсорный отклик при измерении низких концентраций оксида азота для низко-энергопотребляющих сенсоров в целом.

Литература

1. Ilin A. UV effect on NO₂ sensing properties of nanocrystalline In₂O₃ / A. Ilin [et al.] // *Sensors and Actuators*, В: Chemical. – 2016. – V. 231. – P. 491–496.
2. Реутская О.Г. Полупроводниковые газовые сенсоры с низким энергопотреблением для контроля H₂ и CO на подложке из наноструктурированного γ -Al₂O₃ / О.Г. Реутская // *Наноструктуры в конденсированных средах: сб. науч. ст. – 2013. / Ин-т тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси; ред. кол.: П.А. Витязь [и др.]. – Минск, 2013. – С. 293–298.*

УДК 57.089.23

ПЕРСПЕКТИВЫ НЕИНВАЗИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ГЛЮКОЗЫ

Рысик А.Н.¹, Плескачевский Ю.М.¹

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Диабет – это хроническое метаболическое заболевание, которое возникает, когда инсулин не вырабатывается должным образом (тип 1) или не используется (тип 2) для контроля уровня сахара в крови в организме. По данным Всемирной организации здравоохранения, от него страдает сотни миллионов человек на Земле. Независимо от типа, регулярный мониторинг уровня глюкозы помогает предотвратить осложнения, связанные с диабетической гипергликемией и гипогликемией [1, 2], в том числе слепоту, почечную недостаточность, сердечные заболевания, врожденные дефекты и даже смерть [3].

В настоящее время наиболее часто используемый метод определения уровня глюкозы требует укола пальца для извлечения капли крови для анализа – раздражающий процесс, который также может привести к инфекции. Поэтому значительные усилия прилагаются к поиску неинвазивных методов измерения глюкозы с использованием жидкостей организма, таких как слюна, пот, интерстициальная жидкость, слезы и моча, в дополнение к крови [4, 5]. Эти методы могут быть оптическими, спектроскопическими, ультразвуковыми, тепловыми, электрическими или электрохимическими [6].

Недавно были предприняты новаторские попытки изготовления конечных устройств с использованием гибридной печатной электроники на гибких подложках. Их преимущества – низкая стоимость площади поверхности, гибкость, сокращение производственных затрат и отличная совместимость с кожей и клетками человека [7–9]. Однако неинвазивные методы обнаружения, которые можно интегрировать с печатной электроникой, остаются проблемой.

Неинвазивный глюкометр. Неинвазивные методы, которые могут быть использованы для определения глюкозы, можно разделить на две категории. В первую входят методы, которые

измеряют эффекты глюкозы на физические свойства крови и ткани. Эта категория основана на предположении, что глюкоза – доминантный, постоянно изменяющийся признак и, как таковой, способствует значительному изменению в соответствующих физических параметрах ткани. Следовательно, измерение таких параметров позволяет косвенно оценить уровень глюкозы крови. Эта группа методов регистрирует изменения свойств тканей в зависимости от концентрации глюкозы и включает в себя методы определения светорассеяния (light scattering) и эмиссии, оптическую когерентную томографию, методы флуоресцентного анализа, регистрацию температурных и электрических изменений тканей.

Вторая категория включает методы, основанные на определении функциональных групп молекулы глюкозы. К ним относятся спектроскопия ближнего (near-infrared) и среднего (mid-infrared) инфракрасного диапазона длин волн, рамановская спектроскопия, инфракрасный фотоакустический анализ, метод оптической ротации и прочие. Эти методы способны обнаружить глюкозу в ткани или крови независимо от других компонентов или психологического состояния.

В последнее время разработано несколько типов НГ, но их общая проблема состоит в том, что они не могут обеспечить достаточную точность измерения в различных условиях [10].

В настоящее время разрабатываются контактные линзы, которые с помощью специального сенсора измеряют уровень глюкозы не в крови, а в слезах. Причем, они могут делать это постоянно (мониторить уровень глюкозы), разработчики также собираются встроить в линзу светодиодный сенсор, который будет предупреждать человека при достижении опасного уровня глюкозы. Линзы смогут передавать данные на смартфон, чтобы врач мог ознакомиться с динамикой выздоровления пациента.

В разработке сенсора использованы последние научные технологии. Прибор состоит из графеновых нанолитов, к краям которых прикреплены платиновые наночастицы, выполняющие функцию электродов. Также в аппарате находятся молекулы фермента глюкозооксидазы.

Чувствительность устройства позволяет определить глюкозу в анализируемых жидкостях в концентрации 0,3 микроль. Кроме того, разработчики утверждают, что их сенсор стоит дешевле других подобных устройств, созданных с применением нанотехнологий. По словам учёных, сенсор можно также использовать для определения уровня алкоголя в крови или для мониторинга состояния пациентов с болезнью Паркинсона или Альцгеймера – достаточно изменить глюкозооксидазу на другой фермент.

В обширном арсенале современных методов лабораторной и функциональной диагностики, основанных на оценке морфологических, функциональных, биохимических и генетических параметров организма, неинвазивные методы занимают пока еще довольно скромное место.

Между тем, в медицине будущего роль неинвазивной диагностики будет неуклонно возрастать. Определяется это следующими основными моментами. Неинвазивные методы:

- 1) исключают внесение во внутреннюю среду организма болезнетворных вирусов и бактерий, чужеродных веществ (ксенобиотиков);
- 2) позволяют исключить лучевую нагрузку на организм, например, при проведении рентгенологических, радиоизотопных и ультразвуковых методов исследования;
- 3) освобождают пациента от комплекса болевых и неприятных ощущений;
- 4) неинвазивные методы, основанные на использовании сенсорных и передающих сигналы устройствах, позволяют решить две крупные медико-социальные задачи: мониторинг основных биохимических и функциональных показателей и создание дистанционных систем. Последние могут оказаться весьма полезными в качестве средства постоянного слежения из центра, например из больницы или поликлиники, за определенными группами больных (больными с опасностью внезапной кардиальной смерти, гипертонической болезнью, сахарным диабетом и др.) и оказания своевременной помощи при наступивших критических состояниях [11].

Выводы. Таким образом, множество методов из самых различных разделов биофизики было предложено в качестве потенциальных неинвазивных сенсоров уровня глюкозы. Несмотря на то, что многие из этих технологий показали достоверную корреляцию в исследованиях *in vitro* и на животных моделях, ни одна из описанных технологий пока не позволяет эффективно количественно определять концентрацию глюкозы *in vivo* в реальной клинической практике. Эти

методы устранили проблему инвазивности и в перспективе могут стать менее дорогостоящими, чем инвазивные методы, но точность этих методов пока остается значительно ниже, чем инвазивная глюкометрия. Общей проблемой этих методов является низкое соотношение сигнал-шум при регистрации исследуемых параметров, большое влияние температуры, перфузии крови и других факторов, связанных с деятельностью живого организма. Решение этой проблемы требует дальнейших, фундаментальных исследований, посвященных физическим и физиологическим факторам, влияющим на регистрацию концентрации глюкозы. Будущее решение, вероятно, будет связано с внедрением сложных математических методик, способных учесть все факторы, влияющие на результат и разработкой новых материалов и технологий их получения.

Литература

1. The Diabetes Control and Complication Trial (DCCT) Research Group. The effect of intensive treatment of diabetes on the development and progression of long-term complications of insulin-dependent diabetes mellitus. *New Engl J Med* 1993; 329: 997–1036.
2. The UK Prospective Diabetes Study (UKPDS) Group. Intensive bloodglucose control with sulphonylureas or insulin compared with conventional treatment and risk of complications in patients with type 2 diabetes. *Lancet* 1998; 352: 837–853.
3. Wojcicki JM, Ladyzynski P. Toward the improvement of diabetes treatment: recent developments in technical support. *J Artif Organs* 2003;6:73–87
4. K. Rebrin and G. Steil, "Can Interstitial Glucose Assessment Replace Blood Glucose Measurements?", *Diabetes Technology & Therapeutics*, vol. 2, no. 3, pp. 461–472, 2000.
5. R. Tanenberg, B. Bode, W. Lane, C. Levetan, J. Mestman, A. Harmel, J. Tobian, T. Gross and J. Mastrotaro, «Use of the Continuous Glucose Monitoring System to Guide Therapy in Patients With Insulin-Treated Diabetes: A Randomized Controlled Trial», *Mayo Clinic Proceedings*, vol. 79, no. 12, pp. 1521–1526, 2004.
6. J. Wang, «Electrochemical Glucose Biosensors», *Chemical Reviews*, vol. 108, no. 2, pp. 814–825, 2008.
7. A. Nathan, et al. Flexible electronics: the next ubiquitous platform, *Proc. IEEE* 100 (2012). DOI: 10.1109/JPROC.2012.2190168.
8. R.R. Sondergaard, M. Hosel, F.C. Krebs, Roll-to-Roll fabrication of large area functional organic materials, *J. Polym. Sci. Pa.*
9. Rahim Rahimi, Manuel Ochoa, Tejasvi Parupudi, Xin Zhao, Iman K. Yazdi, Mehmet R. Dokmeci, Ali Tamayol, Ali Khademhosseini, Babak Ziaie, A low-cost flexible pH sensor array for wound assessment, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 229, 2016, pp. 609–617.
10. Бабенко А.Ю. Кононова Ю.А., Циберкин А.И. Динамика развития методов контроля гликемии от инвазивных к неинвазивным. Актуальные перспективы // Сахарный диабет. – 2016. – Т. 19, № 5. – С. 397–405.
11. Мезенцева М.А. Неинвазивные методы измерения сахара в крови / М.А. Мезенцева, Т.А. Букрина // Информационно-измерительная техника и технологии: материалы VI научно-практической конференции, Томск, 27–30 мая 2015 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – С. 77–82.

УДК 669.673.8

МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ И В МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКЕ

Савич В.В.

*Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа
Минск, Республика Беларусь*

Введение. В последние годы повышенный интерес потребителей в разных отраслях производства вызывают магниевые сплавы, до недавнего времени использовавшиеся преимущественно в аэрокосмической технике. Это обусловлено особыми свойствами магниевых сплавов [1, 2]:

– низкая плотность (1,35–1,85 г/см³), что в 1,5–2 раза меньше, чем у алюминиевых сплавов, в 4–5 раз меньше, чем у сталей, и близка плотностям современных высокопрочных конструктивных полимеров и композитов, включая углеродные;

– хорошие механические свойства в широком интервале температур от –273 до +350 °С, прежде всего высокие показатели удельной прочности и жесткости;

– высокая демпфирующая способность (в 100 раз выше, чем у алюминиевых сплавов);

– хорошее электромагнитное и акустическое экранирование, высокие теплопроводность и теплоемкость;

– стабильность размеров при длительной эксплуатации и хранении;

– хорошие технологические свойства при обработке резанием, литье и горячей обработке давлением;

– отсутствие эффекта «старения» (охрупчивания) в отличие от конструктивных полимеров.

Однако неудовлетворительная износостойкость и, прежде всего, весьма низкая коррозионная стойкость сдерживают широкое применение магниевых сплавов в приборостроении, в изделиях медицинской техники.

Из-за низких механических свойств технический магний как конструкционный материал не применяется. Его используют в пиротехнике и химической промышленности для синтеза органических препаратов, а также в металлургии в качестве раскислителя, восстановителя и модификатора. Прочность магниевых сплавов σ_B при соответствующем легировании и термической обработке может достигать 350–400 МПа. Для повышения прочностных свойств магниевые сплавы подвергают закалке и старению. Из-за низкой скорости диффузии закалку обычно проводят на воздухе, применяют искусственное старение при сравнительно высоких температурах.

Легирование магниевых сплавов. Основными упрочняющими легирующими элементами в магниевых сплавах являются алюминий и цинк [3–5]. Марганец слабо влияет на прочностные свойства. Его вводят главным образом для повышения коррозионной стойкости и измельчения

зерна. Повышение коррозионной стойкости объясняется образованием защитной пленки гидратированного оксида MgO. Наиболее вредными примесями, снижающими коррозионную стойкость магния, являются никель, железо и, в меньшей степени, медь и кремний. Цирконий и марганец снижают отрицательное действие вредных примесей. Растворимость легирующих элементов, как и в случае алюминиевых сплавов, падает с уменьшением температуры, что позволяет применять к магниевым сплавам термическую обработку, состоящую из закалки с последующим старением. Термическая обработка магниевых и алюминиевых сплавов имеет много общего. Это объясняется близкими температурами плавления и отсутствием полиморфных превращений. Цирконий и церий уменьшают размер зерен, а также оказывают эффективное модифицирующее действие на структуру магниевых сплавов. Влияние легирующих элементов на механические свойства прессованных прутков магния показано на рисунке 1.

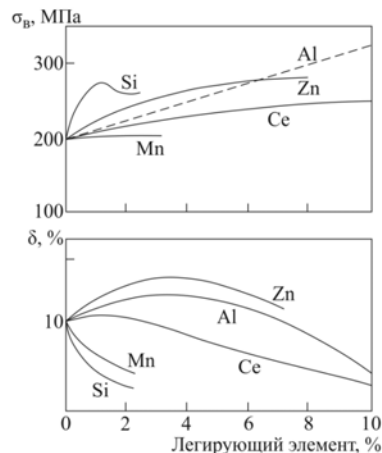


Рисунок 1 – Влияние легирующих элементов на свойства магниевых сплавов [3]

Особенностью магниевых сплавов является пониженная скорость диффузии большинства компонентов в магниевом твердом растворе. Низкие скорости диффузионных процессов способствуют развитию дендритной ликвации, требуют больших выдержек при нагреве, облегчают фиксацию твердых растворов при закалке и затрудняют распад пересыщенных растворов при старении. Для снижения уровня ликвации и повышения технологической пластичности перед деформацией слитки подвергают гомогенизирующему отжигу. Деформированные полуфабрика-

ты из магниевых сплавов отжигают для снятия остаточных напряжений. Для повышения прочностных свойств магниевые сплавы подвергают закалке и старению. Из-за низкой скорости диффузии закалку обычно проводят на воздухе, а искусственное старение применяют при сравнительно высоких температурах (до 200–250 °С) и более длительных выдержках (16–24 ч). Прочностные характеристики магниевых сплавов существенно повышаются при термомеханической обработке, состоящей в пластической деформации закаленного сплава перед его старением. Магниевые сплавы обладают высокой пластичностью в горячем состоянии и хорошо деформируются при нагреве. Для деформированных сплавов диффузионный отжиг обычно совмещают с нагревом для обработки давлением. Магниевые сплавы хорошо обрабатываются резанием, легко шлифуются и полируются. Они удовлетворительно свариваются контактной роликовой и дуговой сваркой, которую рекомендуется проводить в защитной атмосфере. Недостатками магниевых сплавов являются плохие литейные свойства и склонность к газонасыщению, окислению и воспламенению при литье. Для предотвращения дефектов при выплавке используют специальные флюсы; для уменьшения пористости применяют небольшие добавки кальция (0,2 %), а для снижения окисляемости – добавки бериллия (0,02–0,05 %).

Различают деформируемые и литейные магниевые сплавы. Деформируемые сплавы маркируются буквами МА, литейные – буквами МЛ, далее следует номер сплава. Состав и свойства некоторых российских магниевых сплавов приведены в таблице 1 [4, 5].

Таблица 1 – Химический состав и свойства российских магниевых сплавов

Марка сплава	Состав сплава, %				Режим термообработки	Механические свойства	
	Al	Mn	Zn	Прочие		σ_b , МПа	δ , %
Деформируемые сплавы							
МА1	–	1,3–2,5	–	–	Отжиг	200	8
МА2	3,0–4,0	0,15–0,5	0,2–0,8	–	Отжиг	270	10
МА5	7,8–9,2	0,15–0,5	0,2–0,8	–	Закалка + старение	320	14
МА19	–	–	5,5–7,0	0,5–1,0 Zr 0,2–1,0 Cd 1,4–2,0 Nd	Закалка + старение	380	5
МА20	–	–	1,0–1,5	0,05–0,12 Zr 0,12–0,25 Ce	Отжиг	250	20
ВДМ-1	–	–	1,2–2,0	2,5–3,5 Th	Отжиг	300	5
Литейные сплавы							
МЛ5	7,5–9,0	0,15–0,5	0,2–0,8	–	Отжиг	160	3
МЛ8	–	–	5,5–6,6	0,7–1,1 Zr 0,1–0,8 Cd	Закалка + старение	255	5
МЛ10	–	–	0,1–0,6	0,4–1,0 Zr 2,2–2,8 Nd	Закалка + старение	230	3

Применение магниевых сплавов в приборостроении. Детали из магниевых сплавов, полученные литьем под давлением, применяют в производстве оптических и точных приборов (рисунки 2, 3).

Главным преимуществом корпусов и других деталей приборов из магниевых сплавов по сравнению с алюминиевыми, помимо меньшего

удельного веса, – высокая жесткость. Это обусловило еще одно перспективное направление применения магниевых сплавов – шасси и корпуса в целом современных ультрабуков.



Рисунок 2 – Литой корпус современной фотокамеры из магниевых сплавов



Рисунок 3 – Литой корпус бинокля из магниевых сплавов

Новая тенденция современного материаловедения магниевых сплавов – использование для микролегирования редкоземельных элементов, которые позволяют формировать требуемый комплекс физико-механических свойств [6], но не только их.

Магниевые сплавы в изделиях медицинской техники. Магниевые сплавы успешно и традиционно применяются в конструкциях протезов конечностей, деталей инвалидных колясок, рентгеновских аппаратов, установок компьютерной томографии.

Магниевые сплавы оказались перспективными материалами ортопедических имплантатов вследствие ряда преимуществ перед используемыми в настоящее время материалами – титановыми сплавами, коррозионно-стойкими сталями, сплавами на основе тантала, кобальта и др. Он обладает хорошей биосовместимостью и механическими свойствами, близкими свойствам натуральной кости. Магний является одним из важнейших микроэлементов в организме человека, участвующим в более чем в 300 различных ферментативных реакциях и играющим важную роль в энергетическом обмене. Основной продукт разложения магниевых сплавов – водород – также может оказывать благотворное действие, поскольку он обладает антиоксидантной активностью, являясь селективным поглотителем гидроксильных радикалов и пероксинитрита. Идеальные имплантаты для фиксации костей должны обладать меньшей скоростью резорбции

по сравнению с процессом ремоделирования кости [7–9]. Биоразлагаемые магниевые сплавы могут позволить достичь синхронизации изменения их прочности и восстановления костной ткани, в то время как механические свойства постоянных имплантатов из титана и нержавеющей стали остаются практически неизменными в течение всего процесса заживления костного дефекта, что может вызывать явление *stress shielding*, проявляющееся в виде неравномерного ремоделирования костной ткани: сочетания участков резорбции с гипертрофией костной ткани [9]. Кроме того, способность магния к биорезорбции исключает необходимость повторной операции по удалению имплантата [10–12].

Быстрая и неконтролируемая деградация в физиологической среде, сопровождающаяся высвобождением водорода, является основным ограничением использования этих материалов [13]. В некоторых случаях данные ограничения удается преодолеть за счет удачного подбора легирующих элементов сплава – Li, Ca, Nd, Sr и др. Другая попытка – нанесение функциональных покрытий на готовые имплантаты [2], замедляющие их биокоррозию в средах живого организма (главным фактором из которых является кровь – водный раствор электролитов Na^+ , Ca^{2+} и Cl^-). Однако данные исследования начаты относительно недавно и в мире, и в СНГ, и в Беларуси. Поэтому их следует продолжить с учетом уже накопленного мирового опыта. Так фирмой Syntellix AG (Германия) разработан оригинальный биорезорбируемый магниевый сплав MgYREZr, содержащий редкоземельные элементы, из которого организовано промышленное производство ортопедических имплантатов, в частности, компрессионных винтов (рисунок 4), гвоздей, кортикальных стандартных шурупов [14]. При этом по мнению автора, поиск новых легирующих элементов, их сочетания с традиционными, более перспективен для создания эффективного биodeградируемого имплантата на основе магниевых сплавов, чем формирование всякого рода функциональных покрытий на нем. Это связано с тем, что любое покрытие, сдерживая процесс биокоррозии, рано или поздно исчерпает свой ресурс и приведет к неконтролируемой и в ряде случаев преждевременной катастрофической деградации всей конструкции в организме до завершения сращения перелома, формирования регенерированной костной ткани в полном объеме.

Следует отметить, что объемы выпуска только компрессионных винтов фирмой Syntellix AG к 2019 году достигли 15 тыс. шт., что побудило и других производителей разработать конструкции и организовать выпуск других конструкций ортопедических имплантатов – винтов, пластин, игл, используемых при классическом остеосинтезе (рисунок 5) [15].



Рисунок 4 – Компрессионный винт MAGNEZIX® Ø 3,2 мм из биорезорбируемого магниевых сплава MgYREZr Syntellix AG [14]



Рисунок 5 – Ортопедические имплантаты для остеосинтеза из биodeградируемых магниевых сплавов [15]

Высокая пластичность магниевых сплавов позволила освоить производство волочением из них проволоки различных диаметров. Из такой проволоки освоено производство клипс широкой гаммы типоразмеров для клипирования сосудов в ходе полостных операций, а также подобных по действию устройств для пережима язв в желудочно-кишечном тракте [15].

В работе [15] приведена в качестве примера и конструкция кардиоваскулярного стента, выполненного биodeградируемого магниевых сплава (рисунок 6). Конструктивно данный стент похож на традиционные, выполненные из титана, коррозийно-стойкой стали, никелида титана.

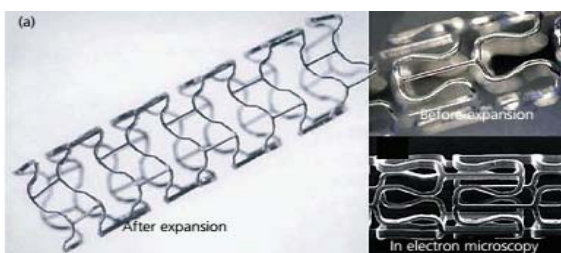


Рисунок 6 – Кардиоваскулярный стент из биodeградируемого магниевых сплава [15]

В работе [15] нет объяснений, в каких клинических случаях показана биodeградируемая (как правило, в течение 9–12 месяцев после имплантации) конструкция кардиоваскулярного стента. Единственным производителем, выпускающим на сегодняшний день биodeградируемые стенты Magmaris® из магниевых сплавов, является фирма BIOTRONIK AG (Швейцария) [16]. Однако даже в брошюре фирмы, посвященной данному продукту, нет сведений о показаниях к применению, зато приведены фотографии препаратов сосудов

с имплантированными стентами Magmaris[®], из которых видно, что даже через 36 месяцев стент сохраняет стабильность при уменьшении диаметра проволоки по сравнению с исходным.

Автор рекомендует всем специалистам, планирующим начать исследования и разработки в области магниевых сплавов, ознакомиться с публикациями, на которые сделаны ссылки в данной работе, а также с фундаментальным трудом [17].

Выводы. Магниевые сплавы вследствие комплекса уникальных физико-механических и физико-химических свойств перспективны для изготовления деталей приборов и изделий медицинской техники, включая биодешадируемые имплантаты различного назначения.

Автор благодарит доктора медицинских наук, профессора Бордакова В.Н., инициировавшего одним из первых в Беларуси исследования в области биодешадируемых магниевых сплавов и ортопедических имплантатов из них.

Литература

1. Елкин Ф. М. Актуальные проблемы металлолечения, производства и применения магниевых сплавов // Технология легких сплавов. – 2007. – № 1. – С. 5–18.
2. Владимиров Б.В. Микродуговое оксидирование магниевых сплавов (обзор) / Б.В. Владимиров, Б.Л. Крит, В.Б. Людин и др. // Электронная обработка материалов. – 2014. – Т. 50. – № 3. – С. 1–38.
3. Кузнецов В.В. *Материаловедение. Цветные металлы и сплавы на их основе. Неметаллические материалы: учеб. пособие* / В.В. Кузнецов, Э.Р. Рубцов, Н.П. Шкуряков // СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2014. – 80 с.
4. ГОСТ 14957-76 Сплавы магниевые деформируемые. Марки.
5. ГОСТ 2856-79 Сплавы магниевые литейные. Марки.
6. Рохлин Л.Л. Перспективы разработки новых конструкционных магниевых сплавов, содержащих редкоземельные металлы / Л.Л. Рохлин, Т.В. Добаткина, Е.А. Лукьянова, И.Е.Тарытина // В кн.: Институт металлургии материаловедения им. А.А. Байкова

РАН – 80 лет. Сборник научных трудов. – М.: Интерконтакт Наука. – 2018. – С.171–186.

7. Mark P. Staigera Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: A review / Mark P. Staigera, Alexis M. Pietaka, Jerawala Huadmaia, George Diasb // Biomaterials. – В. 27. – 2006. – P. 1728–1734.

8. Hazibullah Waizy Biodegradable magnesium implants for orthopedic applications / Hazibullah Waizy, Jan-Marten Seitz, Janin Reifenrath and all // J. Mater. Sci. DOI: 10.1007/s10853-012-6572-2

9. Киселевский М.В. Биоразлагаемые магниевые сплавы – перспективные материалы медицинского назначения (обзор) / М.В. Киселевский, Н.Ю. Анисимова, Б.Е. Полоцкий и др. // Современные технологии в медицине. – 2019. – Том 11. – № 3. – С. 146–157.

10. Pogorielov M. Magnesium-based biodegradable alloys: degradation, application, and alloying elements / Pogorielov M., Husak E., Solodivnik A., Zhdanov S. // Interventional Medicine & Applied Science. – 2017. – В.9. – N1. – P. 27–38.

11. Tian P. Surface modification of biodegradable magnesium and its alloys for biomedical applications / Tian P., Liu X. // Regenerative Biomaterials. – 2015. – В. 2. – No. 2. – P. 135–151.

12. Zhao N. Endothelial responses of magnesium and other alloying elements in magnesium-based stent materials / Zhao N., Zhu D. // Metallomics. – 2015. – В. 7. – No. 1. – P. 118–128.

13. Nene S.S. Biocorrosion and biodegradation behavior of ultralight Mg–4Li–1Ca (LC41) alloy in simulated body fluid for degradable implant applications / Nene S.S., Kashyap B.P., Prabhu N. and all // J. Mater. Sci. – 2015. – В. 50. – No. 8. – P. 3041–3050.

14. Kose Ozkan Magnesium (MgYREZr) bioabsorbable screws in orthopedic surgery. A narrative review // <https://military-medicine.com/article/3830-magnesium-mgyrezr-bioabsorbable-screws-in-orthopedic-surgery.html>

15. Bordbar-Khiabani A. Emerging magnesium-based biomaterials for orthopedic implantation / Bordbar-Khiabani A., Yarmand B. and Mozafari M. // Emerging Materials Research. – 2019. – В. 8. – No. 3. – P. 305–319.

16. Vascular Intervention. Coronary Resorbable Magnesium Scaffold (RMS) Magmaris[®] // BIOTRONIK AG. – 2019. – 6 p.

17. Yufeng Zheng Magnesium Alloys as Degradable Biomaterials // CRC Press Taylor & Francis Group. London – New York. – 2016. – 600 p.

УДК 616.77, 681.2

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ГИБКИХ ВОЛНОВОДОВ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТРОМБОЛИЗИСА

Савченко А.Л.¹, Минченя В.Т.¹, Стамбровский А.С.¹, Королев А.Ю.², Адзерихо И.Э.³

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»
Минск, Республика Беларусь

³Белорусская медицинская академия последипломного образования
, Минск, Республика Беларусь

Объектом исследования является полая волноводно-катетерная система трубчатого типа для воздействия на сосудистые образования и артериальную стенку.

Ранее проводились исследования волноводных систем для ультразвукового тромболизиса [1], основой для которых послужили новые методики разрушения внутрисосудистых образований [2, 3].

На основе исследований разработаны методики медицинского использования этой методики.

В настоящее время сплошные и полые волноводные системы используются в клинической практике и выпускаются серийно на базе Научно-технологического парка БНТУ «Политехник». Для метрологического обеспечения выпуска и дальнейшего совершенствования конструкций и технологии изготовления волноводных систем требуется соответствующее измерительное оборудование, как серийно выпускаемое, так и специальное.

Используемые измерительные устройства по назначению можно разделить на следующие группы:

- устройства для контроля геометрических размеров волноводов;
- устройства для контроля параметров колебаний волноводных систем;
- устройства для контроля выполнения операций в соответствии с назначением волноводных систем.

Контроль геометрических размеров подразумевает измерение диаметра волноводов, формы и размеры переходов от большего диаметра к меньшему, формы и размеры головки, изгибной жесткости. Необходимость контроля жесткости вызвана также наличием корреляции между жесткостью волновода и его акустическими параметрами. Форма профиля продольного сечения внутрисосудистого волновода определяет эффективность проведения ультразвукового воздействия: усиление амплитуды колебаний, поданных на входной торец волновода; потери энергии в материале; вид колебаний на рабочем конце. Для этих целей была разработана автоматизированная установка [4]. Установка включает привод перемещения контролируемого волновода, на который устанавливаются измерительные приспособления – скоба для контроля размеров и устройство для контроля изгибной жесткости. Все элементы работают под управлением персонального компьютера, имеется возможность задавать режимы измерений и выводит результаты в цифровом и графическом виде. Оборудование позволяет осуществлять выходной и межоперационный контроль волноводов в процессе их производства.

Для получения амплитудно-частотных характеристик волноводов была использована система на основе лазерного интерферометра (рисунок 1) [5].

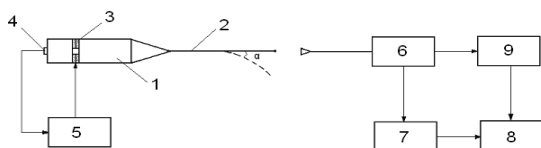


Рисунок 1 – Схема лазерной системы:

- 1 – концентратор; 2 – волновод; 3 – пьезошайбы;
- 4 – датчик вибраций; 5 – блок управления системы вибрационного возбуждения; 6 – лазерный интерферометр; 7 – АЦП; 8 – ПК; 9 – измеритель вибраций

Для контроля амплитуды колебаний на исследуемый участок волновода устанавливалась специальная мишень. Ультразвуковая система с волноводом возбуждалась синусоидальным сигналом с изменяющейся частотой от 15 до 30 кГц, для определения резонансных частот. С помощью переносного оборудования были получены зависимости амплитуды продольных, поперечных и изгибных колебаний от частоты на различных участках волновода и в месте его крепления к преобразователю. АЧХ волноводов обрабатывались с точки зрения установления связи между длиной волновода и его резонансной частотой, при которой продольные колебания имеют максимальную амплитуду, поперечные и изгибные близки к минимуму. Дополнительно для наблюдения за распределением температур по длине волновода использовалась тепловизионная система А20 фирмы «FLIR systems». Оборудование позволяет оценить амплитудно-частотные характеристики системы, на основе чего выполнить сортировку волноводов и проанализировать связь между геометрическими параметрами и резонансными частотами волноводов.

Контроль интенсивности колебаний осуществлялся калориметрическим способом по изменению температуры воды в резервуаре с рабочим концом волновода.

При распространении акустических колебаний в жидкой технологической среде, происходит их поглощение. Также при воздействии УЗ колебаний высокой интенсивности возникает явление кавитации, формируются микро- и макротечения и т.д., что в свою очередь приводит к тому, что энергия упругих колебаний со временем диссипирует в тепловую энергию.

Методика проведения измерений калориметрическим методом заключается в следующем: в сосуд заливается фиксированный объем обрабатываемой жидкости при комнатной температуре (около 20 °С). Далее в сосуд погружается ультразвуковой излучатель и осуществляется УЗ воздействие в течение 20–30 сек. Начальная и конечная температуры внутри калориметрического сосуда замеряются термодатчиками. Интенсивность ультразвука рассчитывается по формуле. Разработана установка, схема которой аналогична описанной, но объем воды сведен к минимуму, а для измерения температуры используется миниатюрная термодатчик с малой постоянной времени. Оборудование позволяет оценить достаточность интенсивности колебаний как для разрушения тромбов в кровеносных сосудах, так и для создания кавитационной струи через отверстия в волноводах. Кавитационная струя в ходе экспериментов наблюдалась визуально.

Для контроля работы волноводной системы разработан аппаратно-программный комплекс, работающий с фантомом сосуда [6].

Схема аппаратной части комплекса показана на рисунке 2.

Фантом сосуда подвергается внутреннему давлению посредством баллонного катетера. Давление создается приспособлением через распределитель. То же давление через распределитель поступает на датчик давления для его измерения и регистрации посредством электронной схемы и персонального компьютера. При подаче давления измеряется деформация фантома, сигнал от измерителя которого также может обрабатываться персональным компьютером. В процессе измерения на фантом сосуда осуществляется ультразвуковое воздействие.

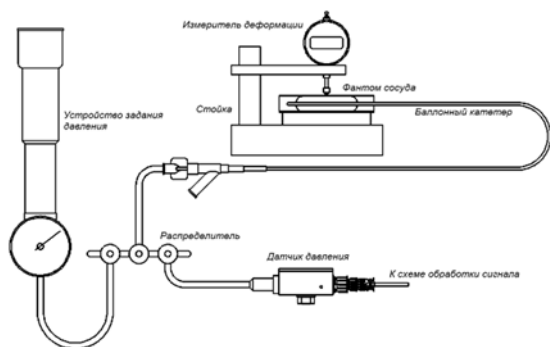


Рисунок 2 – Схема аппаратной части комплекса

Электронная часть аппаратно-программного комплекса состоит из двух узлов – операционной части и интерфейсной части.

Операционная часть предназначена для обработки сигнала индуктивного измерительного преобразователя, в том числе для преобразования его в цифровую форму.

Интерфейсная часть предназначена для передачи измерительной информации на ПЭВМ.

Для опробования был использован фантом сосуда. На фантом в процессе исследований осуществлялось ультразвуковое воздействие полым волноводом, размещаемым внутри фантома в непосредственной близости от баллонного катетера.

При этом в баллоне создавалось давление около 0,4 МПа. Ультразвуковое воздействие осуществлялось в виде пакетов колебаний с частотой следования 0,25 с⁻¹ и скважностью 2. Частота ультразвуковых колебаний в пакете 22 500 Гц.

Результаты опробования свидетельствуют о работоспособности комплекса, который позволяет оценить работу волноводной системы в условиях, приближенных к реальной клинической практике.

Литература

1. Исследование акустических параметров гибких волноводных систем и разработка измерительных устройств на их основе: отчет о НИР (заключительный): ГБ 07-04 / кол. авт. Белорусский национальный технический университет, рук. Минченя В.Т., исполн. Соломахо Д.В., исполн. Савченко А.Л. – Минск, 2007. – 55 с.: ил. – № ГР2007912.
2. Патент 3806 Респ. Беларусь МПК А 61В 17/22, А 61В 17/32. Способ разрушения венозных и артериальных тромбов / Эмилиг Л.А., Мрочек А.Г., Адзериго И.Э. – Оpubл. 30.03.2001.
3. Патент 3808 Респ. Беларусь, МПК А 61В 17/22, А 61В 17/32. Способ разрушения венозных и артериальных тромбоэмболов / Мрочек А.Г., Адзериго И.Э. – Оpubл. 30.03.2001.
4. Измерительный комплекс для контроля параметров гибких волноводов / Г.Г. Маньшин и др. // Проблемы создания информационных технологий. Сб. научных трудов. Вып. 23. – М.: ООО «Техполиграфцентр», 2013. – С. 70–75.
5. А. Bubulis, Ž. Vyšniauskienė, A. Chigarev, V. Minchenya. Investigation of ultrasonic waveguides for medical therapy / ULTRAGARSAS (ULTRASOUND), Vol. 62, No. 4, 2007. – P. 42–44.
6. Савченко А.Л. Аппаратное обеспечение исследования механических свойств кровеносных сосудов / А.Л. Савченко, В.Т. Минченя, А.Ю. Королев, И.Э. Адзериго // Приборостроение–2019. Материалы 12-й междунар. научн.-техн. конф., Минск, 13–15 ноября 2019 г. – Мн.: БНТУ, 2019. – С. 326–327.

УДК 616.77, 681.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ИЗ НИТИНОЛА

Савченко А.Л.¹, Минченя В.Т.¹, Нисс В.С.², Лущик П.Е.²

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»
Минск, Республика Беларусь

Вопросы ультразвуковой обработки никелида титана рассматриваются учеными с конца 90-х годов 20 века. Так как никелид титана в первую очередь интересен проявлением эффекта памяти формы, исследователи уделяют основное внимание проявлению этого эффекта не под действием температурных полей, а при возбуждении в материале механических колебаний ультразвуковой частоты.

С другой стороны, достаточно давно известны способы поверхностного упрочнения материалов методами поверхностного пластического деформирования (ППД) с использованием ультразвука. Эти методы применяют также и к нитинолу.

Таким образом, можно выделить два основных направления в исследованиях ультразвуковой обработки нитинола:

1) инициирование эффекта памяти формы под действием ультразвуковых колебаний;

2) поверхностное упрочнение методами ППД с использованием ультразвука.

Классический способ создания обратимого эффекта памяти формы заключается в термическом воздействии на материал. Заготовка в мартенситном состоянии (при этом она имеет минимальную упругость или сверхэластичность) формируется по желаемому образцу и в этом состоянии заневоливается. Затем она подвергается нагреву до определенной температуры, выдержке при этой температуре и охлаждению. При этом материал заготовки переходит в аустенитную фазу с высокой упругостью. Возврат в мартенситное состояние произойдет при охлаждении до определенной температуры, снова в аустенитное – при нагреве до определенной температуры. Ранее было показано, что для внутрисосудистых эндопротезов, когда малая жесткость требуется при температуре ниже комнатной, а высокая при температуре человеческого тела, оптимальным режимом термообработки является отжиг при температуре 450–550 °С с охлаждением в воде [1].

Для исследования были взяты образцы проволоки Ti-44,48; Ni-49.16; Cu-6.02 фирмы «Фукарава» (Япония) диаметром 0,36 и 0,45 мм, используемой для изготовления каркасов стент-графтов. Проволока подвергалась ультразвуковому воздействию в диапазоне частот 22–26 кГц как в свободном состоянии, так и при механическом воздействии. В ходе исследований было установлено следующее.

1. При получении зигзагообразного образца методом ультразвукового воздействия на нитиноловую проволоку полученная форма образца слабо выражена. Механические и структурные характеристики материала при этом практически не изменяются. Следовательно, использование ультразвукового воздействия в качестве замены термической обработки нецелесообразно.

2. После термообработки обработанных ультразвуком образцов существенных отличий в механических характеристиках и проявлении эффекта памяти формы от исходных не выявлено. Следовательно, использование ультразвукового воздействия как дополнения к термической обработке нецелесообразно.

3. В ходе возбуждения свободных образцов ультразвуком в режиме резонанса на различных частотах на отдельных участках наблюдаются пластические изгибные деформации, сохраняющиеся в течение длительного времени. В некоторых случаях такие деформации возникают после снятия ультразвукового воздействия по истечении нескольких минут или даже часов. Какой-либо закономерности между режимами ультразвукового воздействия и временем возникновения пластических деформаций не выявлено.

Установлено, что пластические деформации появляются в местах дефектов, что позволяет использовать возбуждение проволоки ультразвуковыми колебаниями для отбраковки.

4. Изгибная жесткость образцов из нитиноловой проволоки непосредственно после ультразвукового возбуждения в резонансном режиме не отличается от жесткости исходных образцов. Тем не менее, изгибная жесткость в процессе возбуждения ниже на 30–40 %.

5. Отмечено, что после отрезки образцов примерно в двух третях случаев спустя некоторое время (от нескольких минут до часов) на расстоянии 20–30 мм от места реза наблюдаются пластические изгибные деформации, сохраняющиеся в течение длительного времени. Это позволяет судить о возникновении в нитиноле дефектов кристаллической решетки под влиянием механических напряжений. Вместе с тем при резке ультразвуковым инструментом пластические изгибные деформации отсутствуют. Следовательно, целесообразным является внедрение в технологический процесс изготовления изделий медицинского назначения из нитинола ультразвуковой резки проволоки.

В связи с вышеперечисленным следует сделать вывод, что на данном этапе исследований использование ультразвукового воздействия для упрочнения нитиноловой проволоки и, тем более, замена термообработки нецелесообразна. Имеет смысл использовать ультразвуковое воздействие для обнаружения дефектов в проволоке и бездефектной ультразвуковой резки [2].

Для повышения механических характеристик изделий из нитиноловой проволоки предполагается осуществлять ее поверхностное пластическое деформирование прокаткой или волочением с ультразвуком. Это воздействие сочетается с термической обработкой до или после нее. Обработанная таким образом заготовка подвергается оценке полученных свойств: запоминание приданной формы, механические характеристики (в первую очередь изгибная жесткость стержневых элементов), при появлении эффекта памяти формы – продолжительность времени, в течение которого эти свойства сохраняются.

Для поверхностного пластического деформирования нитиноловой проволоки с ультразвуком предложена установка на преобразователь подшипника качения, который выполняет функцию накатного ролика (рисунок 1).

При исследовании процессов формообразования нитиноловой проволоки с ультразвуком установлено, что при ультразвуковом воздействии резко снижаются силы трения в зонах контакта проволоки и оснастки, и повышается точность копирования изгибов на выступах. Таким образом применение ультразвука эффективно при формировании сложных форм нитиноловых

изделий, таких как зигзагообразных с большим количеством изгибов, крючков с малыми радиусами изгиба и др. [3].

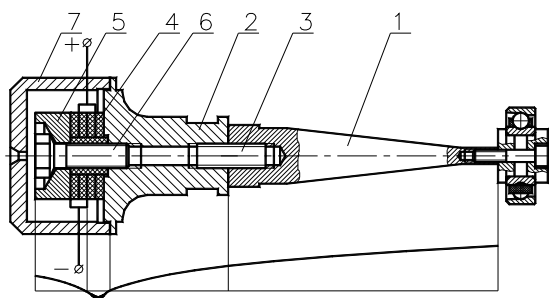


Рисунок 1 – Приспособление для пластического деформирования нитиноловой проволоки

Наибольший интерес представляет использование ультразвука в процессе сварки нитиноловой проволоки.

Лазерная сварка внахлест обеспечивает прочность швов, сравнимую с прочностью сплошного металла, однако следует рассмотреть и другие методы получения сварного соединения, обеспечивающие требуемые характеристики соединения.

Исследовался процесс точечной контактной сварки проволоки внахлест с использованием ультразвуковых колебаний образцов в зоне сварки.

Для сварки концов проволоки использовался сварочный автомат Rofin Select, доработанный для выполнения контактной сварки.

При сварке концы проволоки устанавливаются в специальное приспособление, обеспечивающее прижим свариваемых элементов, ввод ультразвуковых колебаний и подвод электрических сварочных импульсов.

Результаты исследований динамической прочности позволяют выбрать оптимальные режимы сварки и ультразвуковых колебаний, обеспечивающих требуемое качество сварки.

В результате исследований было оказано, что образование неразъемного соединения протекает в две стадии: на первой стадии за счет УЗК происходит разрушение оксидных пленок, адсорбирующих слоев и развитие физического контакта путем сближение вскрытых ювенильных поверхностей; на второй стадии происходит образование локальных микросхватываний соединяемых металлов в результате взаимной диффузии материалов при нагревании их импульсом электрического тока. Установлено, что наибольшая средняя прочность соединения достигается при соотношении длительности электрического импульса к длительности периода ультразвуковых колебаний в пределах 10–15.

Полученные результаты внедрены в технологический процесс изготовления элементов стентграфтов в ООО «Полимедтех».

Литература

1. «Разработка и исследование конструктивных и технологических параметров формообразования изделий медицинского назначения из никелида титана» в рамках задания 4.1.08 «Разработка и исследование технологии задания формы материалам на основе никелида титана для получения изделий медицинского назначения» [электронный ресурс]: отчет о НИР (заключ.) / БНТУ; рук. В.Т. Минченя; исполн.: А.Л. Савченко [и др.] – Мн., 2015. – 120 с. – Библиогр.: С. 117–120. – № ГР 20141055.
2. Савченко А.Л. Способ обнаружения дефектов в проволоке из никелида титана / А.Л. Савченко, В.Т. Минченя, Н.Т. Минченя // Приборостроение-2016. Материалы 9-й междунар. научн.-техн. конф., Минск, 23–25 ноября 2016 г. – Мн.: БНТУ, 2016. – С. 348–349.
3. Рубаник В.В. Формообразование изделий из нитиноловой проволоки с использованием ультразвука / В.В. Рубаник, В.Т. Минченя, А.Л. Савченко // Материалы международного симпозиум «Перспективные материалы и технологии» (Брест, 27–31 мая 2019 г.) – Витебск: ВГТУ, 2019. – С. 267–269.

УДК 681.267.74

ВЕСЫ ДЛЯ ПОКОЛЕСНОГО ВЗВЕШИВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

Савченко А.Л.¹, Минченя Н.Т.², Скурковина Л.Е.¹

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»
Минск, Республика Беларусь

В настоящее время распространены три основных способа измерения массы автомобилей: статическое взвешивание и два вида взвешивания в движении – поосное и поколесное.

При статическом взвешивании автомобиль целиком располагается на грузоприемной платформе, установленной на весоизмерительных опорах. Количество опор варьируется от четырех до восьми в зависимости от размера платформы,

который, в свою очередь, связан с размерами взвешиваемых автомобилей. Такие весы, как правило, изготавливаются под конкретные условия использования, так как их монтаж предусматривает изыскательские работы по изучению свойств почвы в месте установки. Российскими и зарубежными фирмами разработаны типовые конструкции фундаментов и платформ длиной от 3 до 16 метров. Платформа представляет собой

металлический каркас, нередко с бетонным настилом. Металлические части платформы для защиты от коррозии покрываются слоем цинка толщиной 50–100 мкм методом окунания в расплав или гальваническим способом. Это обеспечивает надежную защиту от коррозии на несколько десятилетий. Весы располагаются на поверхности и имеют аппарели для заезда и съезда автомобиля или в приямке, в этом случае поверхность грузоприемной платформы находится на уровне дороги. Такие весы обеспечивают наибольшую точность измерения (до 0,05 % от наибольшего предела взвешивания), однако имеют большие габариты, требуют проведения фундаментных работ, их стоимость относительно высока.

При поосном взвешивании масса автомобиля определяется в движении со скоростью 5–30 км/ч в зависимости от конструкции. Это более выгодно по сравнению со статическим взвешиванием, так как не требуется загонять и останавливать автомобиль на весовой позиции, хотя точность измерения при этом ниже (до 0,1% от наибольшего предела взвешивания), кроме того платформа имеет значительно меньшие размеры. Весы для поосного взвешивания, как правило, представляют собой грузоприемную платформу, установленную на четырех весоизмерительных опорах. Размеры платформы позволяют расположить на ней два колеса автомобиля, установленных на одной оси. Вес автомобиля или автопоезда определяется как сумма отсчетов, полученных при прохождении через платформу всех осей. Поверхность грузоприемной платформы располагается заподлицо с дорожным покрытием, что обеспечивает возможность взвешивания в движении. Основным недостатком таких весов, так же как и статических, является невозможность переустановки на другую позицию.

Весы для поколесного взвешивания являются мобильным устройством, которое легко перемещается и устанавливается на любой позиции. Они представляют собой две грузоприемные платформы с размерами, позволяющими разместить на них одно колесо. Вес автомобиля определяется как сумма отсчетов двух весоизмерительных устройств при прохождении через них всех осей транспортного средства. Скорость движения автомобиля при поколесном взвешивании 5–10 км/ч. Это меньше, чем при поосном взвешивании, так как весы имеют аппарели для заезда и съезда автомобиля. В связи с конструктивными особенностями высота платформ составляет 100–200 мм. Точность измерения самая низкая по сравнению с другими видами взвешивания (например у весов российской фирмы «Метра» М8400-К погрешность 1 % от НПВ), однако во многих случаях такая точность вполне

приемлема. Основными достоинствами весов для поколесного взвешивания является их мобильность и универсальность, так как они менее привязаны к конкретным условиям эксплуатации и конкретным типам автомобилей.

Большинство российских производителей автомобильных весов используют готовые весоизмерительные опоры ведущих зарубежных фирм, например НВМ (Германия). Эти опоры на основе тензодатчиков имеют высокие метрологические характеристики (относительная погрешность до 0,017% от наибольшего предела измерения) и надежную конструкцию. С использованием тензодатчиков связано то, что часть вторичной аппаратуры для обработки измерительного сигнала располагается в непосредственной близости от преобразователей, на расстоянии 10–15 м, а на большие расстояния передается уже сформированный цифровой сигнал (например, используется интерфейс RS-485, позволяющий располагать сопрягаемые устройства на расстоянии 1,2 км). Как правило, в комплект поставки весов включаются отсчетные устройства с цифровыми индикаторами, сопрягаемые с компьютером IBM PC, и специальное программное обеспечение с возможностью выбора типа автомобиля по количеству осей при поосном или поколесном взвешивании, сбора статистической информации о количестве автомобилей и массе грузов, формирования товарно-транспортных накладных и т.п.

Перед авторами была поставлена задача разработать конструкцию весов для поколесного взвешивания автомобилей с высокими метрологическими характеристиками, максимально простой конструкцией, минимальной высотой и стоимостью. При этом конструкция должна обладать определенной мобильностью, чтобы иметь возможность быстрого перемещения на новую точку взвешивания. Площадкой под установку весов может являться как специально подготовленная бетонированная поверхность, так и обычное твердое дорожное покрытие – асфальтовое или бетонное. Поставленная задача была решена следующим образом.

Разработанная конструкция весов состоит из следующих основных элементов: грузоприемная платформа, четыре грузоприемных опоры, основание и электронный блок с цифровым отсчетным устройством.

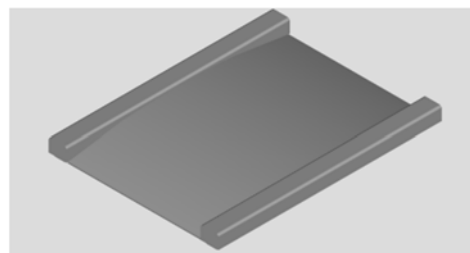


Рисунок 1 – Внешний вид весов

Грузоприемная платформа, внешний вид которой показан на рисунке 1, представляет собой два несущих швеллера, между которыми располагается настил арочной формы, которая позволяет использовать весы без въездных аппарелей и обеспечивает высокую жесткость конструкции. Также разработана конструкция весов с двумя грузоприемными площадками под двухосную колесную тележку (рисунок 2).

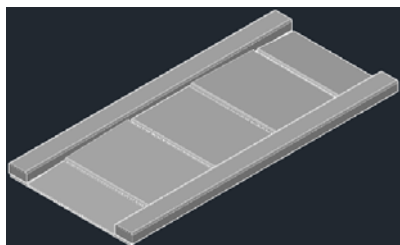


Рисунок 2 – Вариант весов

В полостях швеллеров расположены четыре весоизмерительные опоры на основе малогабаритных бесконтактных дифференциальных индуктивных преобразователей. Выбор преобразователей был обусловлен тем, что они обладают высокими метрологическими характеристиками и позволяют располагать электронный блок на значительном расстоянии. Подобные преобразователи использовались авторами в весоизмерительных опорах дозаторов компонентов бетонных смесей [1]. Электронный блок в этом случае располагался на расстоянии 50 м, в экспериментах датчики нормально работали при длине трехпроводного экранированного кабеля 100 м. В качестве упругого элемента в опорах использован так называемый «механический мост», широко применяемый с тензодатчиками, однако он разнесен по концам швеллеров, то есть каждая опора использует половину упругого элемен-

та. Такая конструкция позволяет максимально уменьшить габариты опор.

Основание весов выполнено в виде двух отдельных швеллеров, вложенных в швеллеры платформы, что позволяет защитить весоизмерительные опоры от воздействия атмосферных осадков, пыли, песка, мусора. Металлические элементы конструкции покрыты слоем цинка для защиты от коррозии.

Электронный блок имеет цифровое отсчетное устройство со светодиодными индикаторами, которое показывает вес автомобиля отдельно по каждой оси и автоматически выполняет суммирование по заданному количеству осей, которое задается переключателем. Предполагается ввести в электронный блок устройство сопряжения с ЭВМ типа IBM PC через последовательный интерфейс RS-485 или с использованием беспроводных систем коммуникации.

Предлагаемое весоизмерительное устройство находится в стадии изготовления. Готовая конструкция будет иметь следующие технические характеристики (указаны ориентировочно):

- наибольший предел взвешивания (на одно колесо) – 10 000 кг;
- наименьший предел взвешивания (на одно колесо) – 100 кг;
- класс точности по ГОСТ 30414-96 – 1;
- габаритные размеры (длина x ширина x высота), мм – 1000×600×75

Взвешивание автомобилей производится при скорости движения до 10 км/ч.

Литература

1. Минченя Н.Т. Весоизмерительное устройство к дозатору компонентов бетонных смесей / Н.Т. Минченя, А.Л. Савченко // Материалы МНТК «Наука и технологии на рубеже XXI века». – Минск, 2000.

УДК 666.651.2

КОРДИЕРИТСОДЕРЖАЩАЯ КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ МАГНИЙСОДЕРЖАЩИХ КОМПОНЕНТОВ

Попов Р.Ю.¹, Дятлова Е.М.¹, Самсонова А.С.¹, Шамколович В.И.²

¹Белорусский государственный технологический университет
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Кордиерит $Mg_2Al_4Si_5O_{18}$ – единственное тройное соединение в системе $MgO-Al_2O_3-SiO_2$; кристаллизуется в поле муллита. Плавится incongruently с выделением муллита и магнезиального расплава при температуре около 1435 °С. Плотность кордиерита 2600–2800 кг/м³, твердость по шкале Мооса – 7–7,5, система кристаллов – ромбическая [1].

Изделия из кордиеритовой керамики нашли применение в машино- и приборостроении, ис-

пользуются для изготовления термостойкой посуды.

Основными проблемами технологии получения кордиеритосодержащих изделий на основе традиционных сырьевых материалов являются высокие температуры синтеза, что необходимо для достижения надлежащего содержания кордиерита в материале, а также узкий интервал спекания, который обычно составляет 15–30 °С и обусловлен образованием расплавов с малой вязко-

стью при быстром нарастании его количества, что приводит к опасности деформации изделий [2].

Синтез кордиерита осуществляется из оксидов. Однако для промышленного изготовления кордиеритовой керамики используют природные материалы – тальк, высококачественные огнеупорные глины и искусственный технический глинозем или электроплавленный корунд [3–5]. Температура обжига кордиерита 1 300–1 410 °С. Кордиеритовая керамика имеет очень короткий интервал обжига, что сильно затрудняет ее производство.

Материалы на основе системы $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ представляют значительный интерес для производства термостойких электроизоляционных керамических материалов, способных работать в условиях высоких температур, не разрушаясь и сохраняя высокие показатели электроизоляционных свойств.

Сочетание низкого значения термического расширения и достаточно высоких электроизоляционных показателей позволяют рассматривать кордиеритовую керамику как один из наиболее перспективных керамических материалов в данной области исследования.

Для изготовления кордиеритовой керамики в настоящей работе предлагается использовать следующие сырьевые компоненты: глина «Керамик-Веско», технический глинозем, тальк онотский, дунит и серпентинит, в качестве добавки – карбонат лития. Количество компонентов подбиралось таким образом, чтобы соответствовать стехиометрическому составу кордиерита, а содержание добавки в пределах 1,5–4,5 мас. %.

Технология изготовления образцов предусматривала следующие стадии. Все сырьевые материалы высушивались в сушильном шкафу при температуре 100–110 °С, затем проходили предварительное дробление и измельчение до прохождения продукта через сито с сеткой №05 (остаток на сите до 2 %). Подготовленные сырьевые компоненты, взвешивали в соответствии с рецептурой, перемешивали и для лучшего усреднения массы и помещали в планетарную мельницу фирмы Retsch PM-100 на 20 мин.

Приготовленная смесь увлажнялась до влажности 6–8 %, готовый пресс-порошок вылеживался в течение 1 сут. для усреднения по составу и влажности. Формование образцов осуществлялось на гидравлическом прессе при давлении 35–40 МПа. Далее производилась сушка образцов в сушильном шкафу при температуре 100–110 °С в течение 2 ч. После чего осуществлялся однократный обжиг в электрической печи при температурах 1 100 °С, 1 150 °С и 1 200 °С с выдержкой при максимальной температуре 1 ч. Скорость подъема температуры в процессе обжига составляла 200–250 °С/ч. Образцы охлаждались инерционно в течение 1 сут.

В процессе выполнения работы исследованы физико-химические характеристики образцов, установлены зависимости свойств материала от состава сырьевых смесей и температуры обжига.

Значения физико-химических свойств изменялись в довольно широком интервале в зависимости от вида применяемого сырья, шихтового состава керамических масс и температуры обжига. Так, кажущаяся плотность образцов, термообработанных при 1 100 °С, в случае применения в качестве магнийсодержащего компонента талька, составила 1 470–2 038 кг/м³, водопоглощение – 16,4–32,4 %, открытая пористость – 33,4–47,6 %; кажущаяся плотность в образцах, содержащих дунит – 1540–2183 кг/м³, водопоглощение – 12,6–26,7 %, открытая пористость – 27,4–41,1 %; кажущаяся плотность при введении в состав масс серпентинита – 1 615–2 252 кг/м³, водопоглощение – 11,2–24,1 %, открытая пористость – 25,3–38,9 %.

С увеличением температуры обжига наблюдается закономерное изменение показателей спекания материала: повышается кажущаяся плотность и механическая прочность образцов, снижается водопоглощение и открытая пористость. Такие изменения свойств связаны с увеличением содержания стекловидной фазы, снижением вязкости расплава, повышением его проникающей способности, а также с процессом формирования некоторых кристаллических фаз.

Таким образом, образцы керамики, полученные на основе различных магнийсодержащих компонентов после обжига при температуре 1200 °С, характеризовались следующими показателями свойств: кажущаяся плотность при использовании талька – 1 659–2 186 кг/м³, водопоглощение – 16,4–32,4 %, открытая пористость – 24,8–38,3 %; кажущаяся плотность в образцах, содержащих дунит – 1 751–2 352 кг/м³, водопоглощение – 8,5–19,5 %, открытая пористость – 19,9–34,2 %; кажущаяся плотность при введении в состав масс серпентинита – 1818–2427 кг/м³, водопоглощение – 6,3–16,4 %, открытая пористость – 15,3–28,7 %.

Следует отметить, что введение в состав керамических масс карбоната лития несколько ухудшает показатели спекания в интервале температур 1 100–1 200 °С, однако присутствие оксида лития способствует снижению температурного коэффициента линейного расширения.

Наилучшими показателями спекания характеризуются образцы, синтезированные на основе серпентинита, что связано с химическим, а также минеральным составом сырья. При этом наибольшее влияние оказывают оксиды щелочных, щелочноземельных металлов, соединения железа.

Механическая прочность образцов (при сжатии), полученных на основе масс исследуемой

системы, в зависимости от вида применяемого магнийсодержащего компонента, а также температуры обжига находятся в достаточно широком интервале: при температуре 1100 °С – 32,0–101,5 МПа; 1150 °С – 34,8–108,7 МПа; при 1200 °С – 47,7–117,6 МПа.

Повышение механической прочности материалов обусловлено интенсификацией процессов фазообразования, причем главенствующую роль играют, в основном, муллит и кордиерит, обеспечивающие достаточно неплохие физико-химические свойства. Кроме того, увеличение содержания образующегося при термообработке расплава, насыщаемого тугоплавкими и огнеупорными компонентами, его проникающая способность, приводящая к цементированию отдельных агрегатов массы в одну керамическую матрицу, также способствует образованию более плотной структуры с необходимым набором механических характеристик.

Значения ТКЛР синтезированных образцов находятся в достаточно широком пределе значений от 0,12 до $4,62 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, что говорит о важной роли используемых компонентов на процессы, протекающие при обжиге керамики, и, прежде всего, на формирование фазового состава. Использование оксида лития, введенного Li_2CO_3 , оказывает положительное влияние на формирование низкорасширяющихся кристаллических фаз, что способствует повышению термостойкости материала.

Согласно данным рентгенофазового анализа, фазовый состав керамики представлен: кордиеритом $\text{Mg}_2\text{Al}_3[\text{AlSi}_5\text{O}_{18}]$, муллитом ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$), корундом $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, низкотемпературным кварцем

(SiO_2), кроме того в материале присутствует твердый раствор кордиерита и сподумена сложного состава, шпинель (MgAl_2O_4), а также в незначительных количествах форстерит (Mg_2SiO_4).

Таким образом, в работе изучены возможности применения различных магнийсодержащих сырьевых материалов для получения кордиеритсодержащих изделий, проведены исследования свойств, структуры, фазового состава синтезированной керамики, установлены закономерности изменения свойств материала в зависимости от типа применяемого магнийсодержащего сырья, его химического состава, температурно-временных режимов обжига образцов. Оптимизирован состав керамических масс, а также уточнены режимы обжига изделий.

Литература

1. Берри Л. Минералогия / Л. Берри, Б. Менсон, Р. Дитрих. – М.: Мир, 1987. – 592 с.
2. Авакумов Г.Н. Кордиерит – перспективный керамический материал / Г.Н. Авакумов, А.А. Гусев. – Новосибирск: Наука, 1999. – 167 с.
3. Балкевич В.Л. Техническая керамика: учеб. пособие для вузов / В.Л. Балкевич. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1984. – 256 с.
4. Мержанов А.Г. СВС-абразивы: производство, свойства, применение / А.Г. Мержанов // Наука – производству. – 1999. – № 10. – С. 5–8.
5. Шихта для изготовления огнеприпаса: пат. 2079467 РФ, МПК⁶ С 04В 33/22; 35/195 / И.Р. Невский, И.Ю. Бескова, В.Б. Акименко, М.В. Рябова, Р.П. Савенкова, Л.Р. Харланов, Ю.А. Чашников; заявитель Акционерное общество Конаковский фаянсовый завод «Фаянс». – № 95108366/03; опубл. 20.05.97 // Открытия. Изобрет. – 1997. – № 14. – С. 105–108.

УДК 666.7

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ВОЛЛАСТОНИТА

Попов Р.Ю.¹, Дятлова Е.М.¹, Самсонова А.С.¹, Шамкалович В.И.²

¹Белорусский государственный технологический университет
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Электроизоляционные материалы должны обладать комплексом важных технических характеристик: высокой механической и электрической прочностью, термостойкостью, высоким удельным объемным сопротивлением. Часто та-электроизоляционные материалы используются при высоких температурах (электроизоляция печей сопротивления, индукторов), в этих случаях имеют значения такие свойства как теплопроводность и термическое расширение. Среди большого множества керамических электроизоляционных материалов востребованной является

керамика на основе силикатов и алюмосиликатов кальция.

Метасиликат кальция $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ – минерал, известный под названием «волластонит». Это соединение существует в двух модификационных формах: $\alpha\text{-CaO} \cdot \text{SiO}_2$ – псевдоволластонит и $\beta\text{-CaO} \cdot \text{SiO}_2$ – собственно волластонит. Волластонит кристаллизуется в триклинной сингонии, а псевдоволластонит – в псевдогексагональной. При 1125 °С волластонит необратимо переходит в псевдоволластонит с незначительным изменением объема. Температура плавления 1540 °С.

Плотность α -волластонита $2,905 \text{ г/см}^3$, а β -волластонита – $2,915 \text{ г/см}^3$. Твердость обеих модификаций, по Моосу, 4,5–6.

Техническую волластонитовую керамику изготавливают из природного волластонита с минимальным содержанием примесей и добавками небольшого количества глины. Температура обжига – 1200–1300 °С. Волластонитовая керамика обладает высокими электрофизическими и механическими свойствами. Для получения изделий технической керамики используют главным образом природное сырье высокой чистоты [2].

Высокая активность к спеканию тонкодисперсной фракции волластонита дает возможность повысить механическую прочность керамики при минимальном содержании спекающей добавки, не снижая термостойкости, а в некоторых случаях вообще отказаться от применения спекающих добавок [3].

Целью данной работы является разработка волластонитсодержащей керамики на основе природного сырья для термо- и электроизоляции индукционных установок.

Разработка керамического волластонитового электроизолятора осуществлялась в двух направлениях. В первом случае использован сравнительно недорогой импортный волластонит, который поставляется в Республику Беларусь для производства облицовочной керамики. В качестве пластификатора использовалась лантненская огнеупорная глина. Поскольку эта глина углистая, она может способствовать некоторой поризации структуры материала. Для снижения теплопроводности материалов, которая играет большую роль при теплоизоляции, в состав масс вводился выгорающий компонент – сапропель (илистые отложения озера «Сергеевское») и вспученный вермикулит. Количество компонентов изменялось в пределах: волластонит (75–85 %), глина лантненская (10–15 %), сапропель (2,5–5 %), вермикулит (2,5–5 %).

По второму направлению использовалось природное сырье Республики Беларусь: в качестве карбонатной составляющей – мел Волковыского месторождения, кварцевыми компонентами являлись кварцевый песок Гомельского ГОК, маршалит (молотый кварцевый песок) и кремнегель (отходы производства фтористого алюминия). Пластифицирующим компонентом являлась лантненская глина. Количество компонентов рассчитывалось исходя из эквимолекулярного соотношения $\text{CaO}:\text{SiO}_2 = 1:1$. Экспериментально установлено, что наиболее качественные образцы получаются при использовании в качестве кремнеземистого компонента маршалита. Кварцевый песок не обеспечивает полного взаимодействия между CaO и SiO_2 , остается свободный CaO , который при гидратации приводит к разрушению образцов.

Исследованы физико-химические характеристики образцов, установлены их зависимости от исходного состава сырьевых смесей и температуры обжига.

С помощью рентгенофазового анализа и электронной микроскопии изучены фазовый состав и структура керамики. Основной кристаллической фазой в образцах обеих серий является волластонит ($\alpha\text{-CaO} \cdot \text{SiO}_2$), а в незначительном количестве присутствует кварц.

Изготовление термостойких электроизоляторов чаще всего осуществляться методом полусухого прессования.

С целью разработки технологических параметров производства изделий было исследовано влияние давления прессования и температуры обжига на свойства образцов волластонитовой керамики оптимального состава, который характеризуется содержанием следующих компонентов, мас. %: природный волластонит – 85, глина огнеупорная – 10, сапропель – 2,5, вермикулит – 2,5.

Изготовление опытных образцов в виде цилиндров диаметром 22 мм осуществлялся методом полусухого прессования при давлениях 10, 20 и 30 МПа. Обжиг материалов проводился при температурах 1100, 1150, 1200 °С с выдержкой 1 час.

Плотность, пористость, водопоглощение синтезированных образцов очень важны, поскольку являются критериальными свойствами, характеризующими степень спекания керамического черепка. Показатели этих свойств коррелируют между собой: водопоглощение и пористость прямо пропорциональны, а кажущаяся плотность по отношению к ним находится в обратно пропорциональной зависимости. Результаты измерения физико-химических свойств приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-химические свойства опытных образцов

Давление прессования, МПа	Физико-химические свойства опытных образцов при температуре обжига, °С		
	1100	1150	1200
	Водопоглощение, %		
10	24,8	24,4	11,8
20	22,7	19,9	8,7
30	20,7	18,3	5,1
	Кажущаяся плотность, кг/м^3		
10	1670	1680	2110
20	1750	1830	2250
30	1790	1880	2400
	Открытая пористость, %		
10	41,5	41,2	25,0
20	39,8	36,6	19,7
30	37,1	34,4	12,2

Как видно из приведенных данных, водопоглощение, плотность и открытая пористость об-

разцов зависят не только от температуры спекания, но и от давления прессования изделий.

Установлено, что с увеличением температуры обжига от 1 100 до 1 200 °С открытая пористость и водопоглощение уменьшается, поскольку усадка образцов увеличивается вследствие более полного спекания, нарастания количества жидкой фазы и сближения частиц под действием капиллярных сил и сил поверхностного натяжения. В первую очередь растворяются мелкие кристаллы и выпуклые участки других кристаллов, осуществляется перенос веществ через расплав, при этом укрупняются кристаллы, сглаживаются их поверхности, что обеспечивает уплотнение системы и увеличение усадки с ростом температуры обжига. Жидкая фаза заполняет поры, что приводит к уменьшению пористости и водопоглощения [4].

С повышением температуры обжига плотность образцов увеличивается. Это обусловлено более полным протеканием процесса спекания.

Механическая прочность керамики зависит не только от общей пористости, но и от размера пор, равномерности их распределения. С повышением пористости механическая прочность керамики уменьшается за счет увеличения дефектности структуры и снижения прочности связей.

Механическая прочность при изгибе материалов, полученных на основе масс исследуемой системы и обожженных при температуре 1200 °С, находится в пределах 39,07–52,36 МПа, при температуре 1150 °С – 20,56–30,87 МПа. Повышение механической прочности материалов обусловлено интенсификацией процессов образования кристаллических фаз, обеспечивающих вы-

сокие физико-химические свойства, а также увеличением количества образующегося при термообработке расплава, который способствует заполнению пор, цементированию керамической матрицы образцов и формированию более плотной структуры синтезированной керамики [4].

На основании проведенных исследований установлено влияние давления прессования и температуры обжига на критериальные свойства и механическую прочность образцов. Установлено, что с достаточно высокой прочностью качественные образцы могут быть получены при давлении 20 МПа и температуры обжига 1 100–1 150 °С.

Разработанный материал характеризуется высоким удельным электрическим сопротивлением (10^{10} – 10^{11} Ом · м) и низкими диэлектрическими потерями ($\text{tg}\delta$ при 1 МГц и 20 °С составляет менее $20 \cdot 10^{-4}$).

Литература

1. Балкевич В.Л. Техническая керамика: учеб. пособие для вузов / В.Л. Балкевич. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1984. – 255 с.
2. Волочко А.Т. Огнеупорные и тугоплавкие керамические материалы / А.Т. Волочко, Е.М. Дятлова. – Минск, 2013. – 383 с.
3. Русанова Л.Н. Керамика из природного воллатсонита для литейных установок алюминиевой промышленности / Л.Н. Русанова [и др.]; под общ. ред. Л.Н. Русановой. – ФГУП «ОНПП «Технология», г. Обнинск Огнеупоры и техническая керамика. 2008. – № 5. – С. 45–47.
4. Августинник А.И. Керамика / А.И. Августинник. – Л.: Стройиздат, 1975. – С. 592.

УДК 53.088:620.179.14

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ СНИЖЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ДВУХПАРАМЕТРОВОГО МАГНИТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ СТАЛЕЙ

Сандомирский С.Г.

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

Важным физическим параметром стали является твердость – свойство материала оказывать сопротивление пластической деформации при контактом воздействии в поверхностном слое. Для характеристики твердости термически обработанной стали чаще всего используют твердость HRC по Роквеллу. Важность этого параметра определяется и тем, что твердость металла находится в тесной связи с его механическими свойствами [1]. Значит, неразрушающий метод определения твердости стали позволит контролировать весь комплекс ее механических свойств.

Магнитный структурный анализ заключается в неразрушающем определении физико-механических свойств сталей и чугунов по ре-

зультату измерения их магнитных параметров. Поэтому измерения магнитном структурном анализе являются косвенными. Физическая основа наличия связей между физико-механическими и магнитными свойствами в том, что эти свойства (каждое – по своему) определяются структурой металла. Связи между механическими и магнитными параметрами сталей подвержены влиянию случайных факторов и имеют не функциональный, а корреляционный характер. На коэффициент R корреляции между результатами прямых и косвенных измерений механических свойств влияют и погрешности измерения магнитных параметров [2].

В [2] показано, что сверх высокие коэффициенты R корреляции между результатами расчета

и измерения HRC сталей и не большие средние квадратичные отклонения (с.к.о.) между ними в ряде работ получены подбором весовых коэффициентов слагаемых без учета неизбежных погрешностей измерения магнитных параметров и вычисления их алгебраических комбинаций, набора статистических данных контроля при влиянии мешающих факторов и корреляционно-го анализа. Оптимальные условия применения магнитного метода не установлены.

Цель доклада – анализ условий и достижимого предела снижения погрешности двухпараметрового косвенного измерения твердости сталей по сравнению с однопараметровым.

Физическая модель для анализа. Пусть установлено, что физическая величина F (в частном случае – твердость HRC стали) может быть определена по результатам измерения корреляционно связанных с ней параметров x_1 и x_2 на основании зависимостей:

$$F(x_1) = \varphi_1(x_1) \text{ и } F(x_2) = \varphi_2(x_2). \quad (1)$$

При этом с.к.о. результатов определения величины F по уравнениям (1) от ее истинных значений составляют соответственно σ_1 и σ_2 , а параметры x_1 и x_2 корреляционно связаны друг с другом с коэффициентом корреляции R ($-1 \leq R \leq 1$). Используем для определения величины F результаты измерения обоих параметров x_1 и x_2 . Величину F определим как среднее арифметическое ее расчета по формулам (1):

$$F(x_1, x_2) = 0,5[\varphi_1(x_1) + \varphi_2(x_2)]. \quad (2)$$

Анализ и его результаты. Проанализируем, как величины с.к.о. σ_1 и σ_2 между истинными значениями F и значениями, рассчитанными по результатам косвенных измерений F с использованием каждого из параметров x_1 и x_2 , и величина коэффициента R корреляции между параметрами x_1 и x_2 влияют на с.к.о. σ_F косвенного определения физической величины F по уравнению (2).

Из теории вероятностей известно, что дисперсия $D(x_1 + x_2)$ суммы двух случайных величин x_1 и x_2 в общем случае равна [3]:

$$D(x_1 + x_2) = D(x_1) + D(x_2) + 2K_{x_1x_2}, \quad (3)$$

где $D(x_1)$ – дисперсия x_1 ; $D(x_2)$ – дисперсия x_2 ; σ_1 и σ_2 – с.к.о. величин x_1 и x_2 ; R – коэффициент корреляции между ними; $K_{x_1x_2} = R\sigma_1\sigma_2$ – их корреляционный момент.

Из (3) с.к.о. σ_Σ суммы величин x_1 и x_2 равно:

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + 2R\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}. \quad (4)$$

С учетом (4) и (2) получим для с.к.о. σ_F косвенного определения физической величины F по уравнению (2) аналитическое выражение:

$$\sigma_F = 0,5\sqrt{\sigma_1^2 + 2R\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}. \quad (5)$$

Для обобщения анализа введем относительные величины:

$$\bar{\sigma}_2 = \sigma_2/\sigma_1 \text{ и } \bar{\sigma}_F = \sigma_F/\sigma_1 \quad (6)$$

Величина $\bar{\sigma}_F$ показывает, в какой степени использование второго параметра x_2 для определения физической величины F снижает (если $\bar{\sigma}_F < 1$) или увеличивает (если $\bar{\sigma}_F > 1$) с.к.о. ее определения по уравнению (2) по сравнению с использованием только одного параметра x_1 . С учетом (6) из (5) получим:

$$\bar{\sigma}_F = 0,5\sqrt{1 + 2R\bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_2^2}. \quad (7)$$

На рисунке в диапазоне $0 \leq \bar{\sigma}_2 \leq 3$ приведены результаты расчета по формуле (7) зависимостей $\bar{\sigma}_F = \bar{\sigma}_F(\bar{\sigma}_2)$ при разных значениях коэффициента R корреляции между параметрами x_1 и x_2 в возможном диапазоне $-1 \leq R \leq 1$ его изменения.

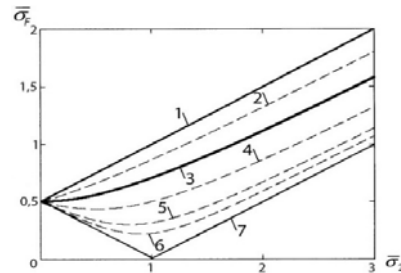


Рисунок – Зависимость относительного среднеквадратичного отклонения (с.к.о.) $\bar{\sigma}_F$ результатов определения физической величины F по формуле (2) от относительного с.к.о. $\bar{\sigma}_2$ второго параметра:

1–7 – соответственно при $R = 1; 0,5; 0; -0,5; -0,8; -0,9; -1$

Анализ зависимостей $\bar{\sigma}_F = \bar{\sigma}_F(\bar{\sigma}_2)$ показал [4], что значения $\bar{\sigma}_F < 1$ нельзя достигнуть ни при каких значениях R , если $\bar{\sigma}_2 \geq 3$. В этих случаях применение двухпараметрового метода не обеспечит снижение с.к.о. определения F по сравнению с однопараметровым ни при каких условиях. При $1 \leq \bar{\sigma}_2 < 3$ величина $\bar{\sigma}_F$ снижается по мере уменьшения $\bar{\sigma}_2$ и приближении R к значению «-1». Необходимым условием двукратного снижения с.к.о. определения параметра F двухпараметровым методом по сравнению с однопараметровым является одновременное выполнение условий $R < -0,5$ и $1 \leq \bar{\sigma}_2 < 2$. На практике достижимо примерно четырехкратное снижение с.к.о. $\bar{\sigma}_F$ двухпараметрового измерения физической величины F по сравнению с однопараметровым: для этого необходимо одновременное выполнение условий $R < -0,9$ и $1 \leq \bar{\sigma}_2 < 1,5$.

Результаты анализа подтверждены снижением погрешности определения временного сопротивления разрыву стали 40X, подвергнутой отпуску после закалки, твердости HRC углеродистых сталей, подвергнутых отпуску после закалки, по результатам измерения их коэрцитивной силы H_c и остаточной намагниченности M_r по сравнению с использованием любого из этих параметров.

Выводы. Эффект снижения среднего квадратичного отклонения (с.к.о.) σ_F определения твердости стали (физической величины F) при использовании второго параметра x_2 в наибольшей степени проявляется при обратной корреляционной связи между параметрами x_1 и x_2 с максимальным модулем $|R|$ коэффициента R корреляции между ними. Наиболее существенно σ_F снижается при близких величинах с.к.о. σ_1 и σ_2 между истинными значениями F и значениями, рассчитанными по результатам косвенных измерений F с использованием каждого из параметров x_1 и x_2 .

Применение двухпараметрового метода не обеспечит снижение σ_F определения твердости стали по сравнению с однопараметровым методом, если с.к.о. σ_2 измерения F с использованием второго параметра x_2 более, чем 3 раза превосходит с.к.о. σ_1 измерения F с использованием пер-

вого параметра x_1 . На практике достижимо примерно четырехкратное снижение с.к.о. $\bar{\sigma}_F$ двухпараметрового измерения физической величины F по сравнению с однопараметровым

Область применения результата – измерения в неразрушающем контроле и смежных областях физики и техники. Результаты анализа позволят выбрать оптимальные параметры для косвенного двухпараметрового определения твердости сталей, оценить достижимую погрешность определения твердости.

Литература

1. Сандомирский С.Г. Статистический анализ взаимосвязей между механическими свойствами и твердостью стали 40X / С.Г. Сандомирский // Актуальные вопросы машиноведения. Сб. науч. трудов. – Вып. 7, 2018. – Минск, ОИМ НАН Беларуси. – С. 339–341.
2. Сандомирский С.Г. Влияние точности измерения и диапазона изменения физической величины на коэффициент корреляции / С.Г. Сандомирский // Измерительная техника. – 2014. – № 10. – С. 13–17.
3. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
4. Sandomirski S.G. Analysis of Requirements and the Feasible Limit for Error Reduction in Two-Parameter Magnetic Determination of Steels' Hardness / S.G. Sandomirski // Приборы и методы измерений. – 2020. – Т. 11, № 3. – С. 236–244.

УДК 621.373:535

ОДНОМОДОВЫЙ ГАЗОВЫЙ ЛАЗЕР С ПРОИЗВОЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНОЙ И ТИПОМ АНИЗОТРОПИИ РЕЗОНАТОРА Свирина Л.П.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

В работе [1] установлено, что поляризация генерируемого излучения в газовом лазере определяется анизотропией активной среды, анизотропией резонатора и влиянием внешнего магнитного поля. Это утверждение справедливо для анизотропных лазеров со всеми известными в настоящее время активными средами.

Основной проблемой при теоретическом описании процесса генерации лазеров с анизотропными резонаторами является тот факт, что собственные состояния поляризации активной среды и резонатора различны (магнитное поле можно рассматривать как дополнительную анизотропию резонатора). В рамках разработанного в [2] формализма векторов и матриц Джонса вектор Джонса электромагнитной волны, а также матрицы Джонса активной среды и резонатора, имеющие в общем случае различные собственные вектора, записываются в едином декартовом базисе, что позволяет проследить эволюцию состояния поляризации генерируемого поля и учесть равноправное влияние анизотропии среды

и резонатора на формирование поляризации генерируемого излучения.

В настоящей работе для различных переходов между рабочими уровнями активной среды одномодового двухчастотного газового лазера и различных типов анизотропии резонатора описан непрерывный переход от изотропного к сильно анизотропному резонатору, что позволило предложить классификацию лазерных систем в зависимости от соотношения величин анизотропии среды и анизотропии резонатора.

В случае эллиптических ортогональных состояний поляризации и равных интенсивностей генерируемых волн в отсутствие продольного магнитного поля на активной среде, уравнения генерации двухчастотного линейного газового лазера принимают вид [3]:

$$\frac{dI_1}{d\tau} = 2I_1 \operatorname{Re} \left\{ \frac{P_1}{P} - \frac{1}{2\tau_0} \left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) + I_1 (\theta_1 + \theta_2 th^2 2\beta_1) - \left(1 - \frac{\cos 2(\gamma_{1M} - \gamma_1)}{\operatorname{ch} 2\beta_{1M} \operatorname{ch} 2\beta_1} - th 2\beta_{1M} th 2\beta_1 \right) \right\}, \quad (1)$$

$$\frac{dz_1}{d\tau} = \frac{1}{2\tau_0} \left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \left(\frac{-\sin 2z_1}{\text{ch} 2\beta_{1M}} + i \text{th} 2\beta_{1M} \right) - (2)$$

$$iI_1 + \theta_2 \text{th} 2\beta_1.$$

Здесь I_1 – безразмерная интенсивность, $z_1 = \gamma_1 + i\beta_1$, γ_1 – азимут, $\xi_1 = \text{th} \beta_1$ – эллиптичность генерируемой волны 1, характеристики волны 2 определяются следующим образом: $I_2 = I_1$, $\gamma_2 = \gamma_1 + \pi/2$, $\xi_2 = -\xi_1$, τ – безразмерное время, индекс M отнесен к параметрам пустого резонатора. Обозначения остальных величин аналогичны принятым в [3].

В отсутствие магнитного поля уравнения (1), (2) инвариантны относительно преобразования

$$G = \{I_1, \gamma_1, \xi_1, \gamma_{1M}, \xi_{1M}\} \rightarrow \{I_1, -\gamma_1, -\xi_1, -\gamma_{1M}, -\xi_{1M}\}. \quad (3)$$

Эллиптические ортогональные собственные векторы в резонаторе линейного лазера можно создать, поместив в него пластинки с линейной 2ψ и циркулярной 2ϕ фазовой анизотропией:

$$\gamma_{1M} = 0, \sin 2\beta_{1M} = -\sin 2\phi \text{ctg} 2\psi, \quad (4)$$

$$\gamma_{2M} = \gamma_{1M} + \pi/2, \beta_{2M} = -\beta_{1M}.$$

На рисунке 1 приведена однопараметрическая диаграмма, иллюстрирующая поведение устойчивых стационарных и периодических решений для перехода $j_b = 1 \rightarrow j_a = 2$ между рабочими уровнями среды при изменении линейной фазовой анизотропии ψ ($\phi = 0$), т. е. при переходе от изотропного к сильно анизотропному резонатору.

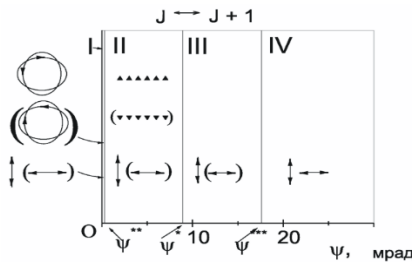


Рисунок 1 – диаграмма устойчивых решений уравнений генерации двухчастотного He-Ne лазера для $j_b = 1 \rightarrow j_a = 2$ перехода и линейной фазовой анизотропии резонатора

При переходе от изотропного к анизотропному резонатору в точке O происходит снятие вырождения собственных мод лазера по поляризации и переход от одночастотного к двухчастотному режиму генерации, что сопровождается явлением нарушения поляризационной симметрии, которое описывается бифуркацией типа вилки. При этом симметрия уравнений не зависит от параметров резонатора: $G = \{I_1, \gamma_1, \xi_1\} \rightarrow \{I_1, -\gamma_1, -\xi_1\}$, а бифуркация

типа вилки для устойчивых решений, схематически показанная на рис. 1а для перехода $j \rightarrow j+1$, описывается выражениями:

$$\Phi_1 = \pm \pi/4, \text{sh} 2\beta_1 = \pm \left\{ -\alpha/2q - (\alpha^2/4q^2 - 1)^{1/2} \right\},$$

$$\alpha = 2I_1\tau_0\theta_2, q = \sin 4\psi. \quad (5)$$

При прохождении бифуркационной точки $\psi = 0$ волна с линейной поляризацией распадается на две волны с циркулярными ортогональными состояниями поляризации (см. рисунок 2, а). Именно эти состояния поляризации являются собственными для активной среды лазера.

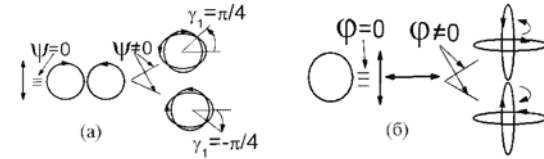


Рисунок 2 – снятие вырождения по поляризации и нарушение поляризационной симметрии для перехода $j \rightarrow j+1$ (а) и $j \rightarrow j$ (б)

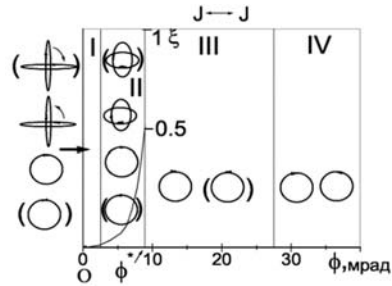


Рисунок 3 – диаграмма устойчивых решений уравнений генерации двухчастотного He-Ne лазера для перехода $j_b = 2 \rightarrow j_a = 2$ и циркулярной фазовой анизотропии резонатора

Поскольку для перехода $j \rightarrow j+1$ преобразование симметрии G не зависит от параметров резонатора, выбор режима в генерации полностью определяется флуктуациями поляризации в начальный момент. Это позволяет утверждать, что в данном случае имеет место спонтанное нарушение поляризационной симметрии. При $\psi > 0$ появляется бистабильность двухчастотных режимов с большими значениями эллиптичностей (практически циркулярно поляризованных), переходящих друг в друга при преобразовании симметрии G . На рисунке 1 эти режимы существуют в области I очень малых значений анизотропии резонатора по сравнению с анизотропией среды (лазер с квазиизотропным резонатором). Бистабильность режимов генерации на диаграмме показана скобками. В точке Ψ^{**} в результате бифуркации седло-узел рождается предельный цикл (отмечен треугольниками), существующий в области II, для которой анизотропия среды и резонатора сопоставима по величине с анизотропией среды (лазер со слабо анизотропным резонатором). В точке Ψ^* предельный цикл стягивается в точку и исчезает.

В области значений $\Psi > \Psi^*$ мы имеем «лазер с сильно анизотропным резонатором», одно- и двухчастотные режимы генерации которого подробно исследованы многими авторами. В областях I и II возможны режимы одночастотной генерации линейно поляризованных волн.

В лазере с циркулярной фазовой анизотропией резонатора ($\psi = 0$) для перехода $j \rightarrow j$ в результате бифуркации типа вилки волна с круговой поляризацией (см. рисунок 1, б) в точке $\varphi = 0$ распадается на две волны с ортогональными, линейными состояниями поляризации, которые являются собственными состояниями поляризации среды. При $\varphi > 0$ в области I появляется бистабильность двухчастотных режимов с близкими к линейным состояниями поляризации, азимуты которых вращаются в противоположные стороны (показаны на рисунке стрелками), а интенсивности и эллиптичности описываются выражениями:

$$I_1 = \frac{P_1/P - a}{\theta_1}, \quad \text{th } 2\beta_1 = \pm \frac{a\theta_1}{(P_1/P - a)\theta_2}, \quad (6)$$

$$a = (1 - \cos 4\varphi) / \tau_0.$$

УДК 621.78.014.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН ПРИ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ НА УСТАНОВКЕ «УБТО 1801»

Соловьёв Я.А.¹, Пилипенко В.А.¹, Яковлев В.П.², Хлопков Н.С.², Гринцевич Е.В.², Сарычев О.Э.¹

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Республика Беларусь

²ООО «Перспективные инновационные технологии»
Минск, Республика Беларусь

Быстрая термическая обработка (БТО) кремниевых пластин является одной из ключевых операций в полупроводниковой технологии, значение которой возрастает одновременно с уменьшением размеров элементов интегральных схем [1]. Самым распространенным способом БТО является нагрев пластин до заданной температуры некогерентным световым излучением кварцевых галогенных ламп импульсами секундной длительности, который реализует режим теплового баланса, т.е. обеспечивается однородное распределение температуры по объему пластины [2]. При этом важно избегать неоднородного поглощения светового потока по площади пластины, что при БТО кремниевых подложек со сформированными *p-n*-переходами и топологическим рельефом может быть гарантировано только при их облучении с обратной стороны. Данная схема БТО целиком реализована в установке «УБТО 1801», в которой нагрев пластин осуществляется световым импульсом прямоугольной формы с задаваемой мощностью и длительностью, а контроль температуры рабочей стороны пластины осуществляется с по-

Выбор одного из этих решений, связанных с преобразованием G будет задаваться резонатором. Переход из области I в область II не сопровождается бифуркацией, и граница раздела между этими областями условна. Область II, где значение эллиптичности (сплошная линия на рисунке) возрастает от очень малой величины, задаваемой активной средой, до больших значений, задаваемых резонатором, соответствующих циркулярной анизотропии, можно рассматривать как область конкуренции анизотропии среды и резонатора (лазер со слабо анизотропным резонатором). В областях III и IV поляризация задается резонатором (лазер с сильно анизотропным резонатором).

Литература

1. De Lang H. Polarization properties of optical resonators, passive and active. // Philips Research Repts. Suppl. – 1967, No. 8. – P. 3–75.
2. Войтович А.П., Севериков В.Н. Лазеры с анизотропными резонаторами. – Минск: Наука и техника, 1988. – 272 с.
3. Svirina L.P. Polarization symmetry-breaking and restoration in vectorfield lasers // J of Optics B. – 2001. – Vol. 3, No. 1. – P. S133–S138.

мощью пирометра «Термоскоп-600-1С» и платино-родиевой термопары ТП-0188/2-1-ПП(S) [3]. Однако как термопарный, так и пирометрический контроль температуры поверхности кремниевых пластин при БТО в данных условиях нагрева имеют соответствующие ограничения. На показания термопары существенное влияние оказывает искажение температурного поля пластины в зоне их контакта [4], а также ее тепловая инерция [5]. Пирометрический контроль ограничен нижним порогом чувствительности пирометра, необходимостью учета степени черноты контролируемой поверхности пластины, определяемой материалом покрытия и температурной зависимостью степени его черноты, а также фазовыми изменениями в материале покрытия. Таким образом, для улучшения управляемости процесса нагрева БТО кремниевых пластин и точности контроля температуры необходимо установить зависимость температуры пластины от условий БТО.

Постановка задачи. Зависимость температуры кремниевой пластины при БТО описывается уравнением теплопроводности [1, 2]:

$$\rho c h \frac{dT}{dt} = (1 - R)\eta_{эл} P_{эл} - 2\varepsilon_{Si} \sigma (T^4 - T_{окр}^4), \quad (1)$$

где ρ – плотность кремния [$\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$], c – удельная теплоемкость кремния [$\text{Дж}\cdot\text{г}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$], h – толщина кремниевой пластины [см], T – температура пластины [К], t – время нагрева [с], R – коэффициент отражения ИК излучения ламп от поверхности нагреваемой пластины, $P_{эл}$ – электрическая мощность ламп [Вт], $\eta_{эл}$ – коэффициент преобразования электрической мощности ламп нагрева в плотности мощности светового потока [см^2], ε_{Si} – степень черноты кремния, σ – постоянная Стефана-Больцмана [$\text{Вт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{К}^{-4}$], $T_{окр}$ – температура стенок камеры [К].

Таким образом, для моделирования температуры нагрева пластины необходимо установить численное значение коэффициента $\eta_{эл}$.

Методика эксперимента. С целью определения температуры пластины использовали известные температуры фазовых переходов: образование эвтектики алюминий-кремний – 850,2 К, плавление алюминия – 933,5 К и плавление серебра – 1 235,1 К. Для этого на рабочую сторону высоколегированной пластины марки КЭМ 0,003 (111) с полированной и шлифовано-травленной обратной стороной наносили тонкие пленки алюминия и серебра. Во избежание формирования эвтектики алюминий-кремний при исследовании точки плавления перед нанесением алюминия на рабочей поверхности кремниевой пластины формировали слой SiO_2 толщиной порядка 0,1 мкм. Далее пластины нагревали в камере установки «УБТО 1801» при заданной мощности в течение 40 с. Отсчет времени производили встроенным таймером системы управления установкой с дискретностью $\Delta t = 96$ мс. Момент фазового перехода фиксировался по изменению показаний пирометра.

Численное интегрирование уравнения (1) с учетом материала покрытия рабочей стороны пластины выполняли в соответствии с выражением:

$$T = T_0 + \sum_{i=1}^n \frac{[(1-R)\eta_{эл} P_{эл} - (\varepsilon_{Si} + \varepsilon_{Me}) \sigma (T_i^4 - T_{окр}^4)] \Delta t}{\rho(T_i) c(T_i) h}, \quad (2)$$

где T_0 – начальная температура пластины, n – количество интервалов нагрева длительностью Δt , ε_{Me} – степень черноты материала покрытия рабочей стороны пластины.

Зависимость плотности кремния от температуры рассчитывали по общепринятой формуле:

$$\rho(T) = \rho_0 [1 - 3\alpha(T)(T - T_0)], \quad (3)$$

где $\rho_0 = 2,33$ [$\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$] – плотность кремния при температуре T_0 , $\alpha(T)$ – термический коэффициент линейного расширения кремния с учетом температуры пластины. Величину $\alpha(T)$, в свою очередь, определяли на основании справочных данных [6] в диапазоне температур от 300 К до

1 400 К и аппроксимировали полиномом четвертой степени:

$$\alpha(T) = -4,29 \cdot 10^{-18} T^4 + 1,6 \cdot 10^{-14} T^3 - 2,21 \cdot 10^{-11} T^2 + 1,56 \cdot 10^{-8} T - 5,91 \cdot 10^{-7}. \quad (4)$$

Зависимость $c(T)$ в диапазоне температур от 300 К до 1400 К определяли на основании справочных данных [6] и аппроксимировали полиномом четвертой степени:

$$c(T) = -8,62 \cdot 10^{-13} T^4 + 3,41 \cdot 10^{-9} T^3 - 4,85 \cdot 10^{-6} T^2 + 3,1 \cdot 10^{-3} T + 0,132. \quad (5)$$

Значение параметра ε_{Si} принимали равным 0,7 [1]. Величину параметра ε_{Me} для алюминия принимали равной [7]:

$$\varepsilon_{Me} = 5,14 \cdot 10^{-5} T + 1,34 \cdot 10^{-2}, \quad (6)$$

а для серебра [7]:

$$\varepsilon_{Me} = 3,15 \cdot 10^{-5} T + 4,11 \cdot 10^{-3}. \quad (7)$$

Величину параметра R принимали равной 0,3.

Решение уравнения (2) относительно параметра $\eta_{эл}$ осуществляли итерационным методом путем подстановки вместо параметра T известной температуры соответствующего фазового перехода материала покрытия рабочей стороны кремниевой пластины, а вместо параметра n – номера интервала нагрева, после которого был зафиксирован фазовый переход.

Результаты и их обсуждение. Анализ результатов расчета в параметра $\eta_{эл}$ в соответствии с формулами (2–7) (таблица 1) показывает, что его максимальный разброс не превышает $\pm 5\%$. Это может быть обусловлено дисперсией коэффициента отражения нерабочей поверхности пластины, мощности нагрева, а также незначительными отклонениями от расчетных значений степени черноты кремния и покрытий, связанных с состоянием поверхности. При этом погрешность предсказания температуры пластины в соответствии с формулой (2) при ее увеличении на 550 К не превышает 2,3%, а при увеличении температуры на 930 К – не превышает 2,0%.

Таблица 1 – Результаты расчета параметра $\eta_{эл}$

Температура фазового перехода, °К	Тип обратной стороны пластины	Электрическая мощность ламп, Вт	Время нагрева пластинны до фазового перехода, с	$\eta_{эл} \times 10^{-3}$ см ²
850,2	полированная	708,2	34,176	4,93
	шлифовано-травленная	712,7	39,168	5,04
933,5	полированная	1 059,5	24,384	5,18
	шлифовано-травленная	1 063,4	24,384	5,07
1 235,1	полированная	2 736,6	16,32	5,42
	шлифовано-травленная	2 740,0	16,32	5,38

С учетом изложенного, для прогнозирования температуры нагрева кремниевой пластины (без покрытий) при БТО на установке «УБТО 1801» выражение (2) принимает следующий вид:

$$T = T_0 + \sum_{i=1}^n \frac{[5,17 \cdot 10^{-3} (1-R) P_{эл} - \sigma (T_i^4 - T_{окр}^4)] \Delta t}{\rho(T_i) c(T_i) h}. \quad (8)$$

Заключение. На базе уравнения теплопроводности разработана математическая модель нагрева высоколегированных кремниевых пластин при БТО на установке «УБТО 1801», предсказывающая температуру пластины при ее увеличении на 550–930 К с погрешностью менее 2,3 %.

Литература

1. Doering R. Handbook of semiconductor manufacturing technology / R. Doering, Y. Nishi. New York; CRC Press, 2008. – 1722 p.

2. Пилипенко В.А. Быстрые термообработки в технологии СБИС / В.А. Пилипенко. – Мн.: Изд. Центр БГУ, 2004. – 531 с.

3. Солодуха В.А. Роботизированная установка быстрой термической обработки для создания изделий электронной техники / В.А. Солодуха, В.А. Пилипенко, В.П. Яковлев // Доклады БГУИР. – 2019. – № 4 (122). – С. 92–97.

4. Кулаков М.В. Измерение температуры поверхности твердых тел / М.В. Кулаков, Б.И. Макаров. – М.: «Энергия», 1969. – 136 с.

5. Сорокин Д.Н. Динамические характеристики термопар / Д.Н. Сорокин, Ю.П. Джусов. – Обнинск.: ФЭИ, 1973. – 29 с.

6. Шелудяк Ю.Е. Теплофизические свойства компонентов горючих систем / Ю.Е. Шелудяк, Л.Я. Кашпоров, Л.А. Малинин, В.Н. Цалков. М.: НПО Информ ТЭИ, 1992. – 184 с.

7. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. М.: «Энергия», 1977. – 344 с.

УДК 621.382.002

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОК SiOF ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ИОННЫХ ПУЧКОВ

Телеш Е.В., Данилевич Д.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Актуальной проблемой микро- и наноэлектроники является поиск новых материалов с низкой диэлектрической проницаемостью (low-k-диэлектрики) и разработка современных технологий формирования тонкопленочных слоев из этих материалов. В качестве изолирующих диэлектрических слоев с низкой диэлектрической проницаемостью могут использоваться различные классы органических и неорганических соединений, а также гибридные неорганические - органические соединения. Традиционные диэлектрики, например SiO₂, имеют ε = 3,9 и выше, что не удовлетворяет современным требованиям. Для снижения диэлектрической проницаемости плёнок диоксида кремния применяют насыщение их фтором [1].

В последние годы все больше внимания исследователей привлекают методы, основанные на нанесении тонкопленочных покрытий из ионных потоков или пучков [2]. Нами предложен новый метод синтеза легированных пленок диоксида кремния, использующий для формирования ионных пучков вторичный плазменный разряд в ионном источнике на основе ускорителя с анодным слоем [3]. Внешний вид пучка приведен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид ионного пучка

Проведено исследование влияния состава рабочего газа и температуры подложки на структурно-фазовые, электрофизические и оптические характеристики покрытий из SiOF. Экспериментальные исследования проводили на установке ВУ-1А, оснащенной ионным источником на основе ускорителя с анодным слоем. В качестве рабочих газов использовались, смесь моносилана с аргоном (5 % SiH₄+95 % Ar), хладон-14 и кислород. Покрытия наносились на неподвижные подложки из кремния и стекла К8. Остаточное давление составляло ~4,0·10⁻³ Па, ускоряющее напряжение –2,0 кВ, ток разряда –60 мА, потенциал диафрагмы – 0. Скорость нанесения изменялась в диапазоне 1,1–1,2 нм/с. Температура подложки не превышала 313 К. Результаты исследования состава рабочего газа на электрофизические параметры слоев приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерения электрофизических параметров слоев

P _{O2} , Па	P _{CF4} , Па	P _{SiH4} , Па	ε	tgδ	ρ _v , Ом·м
2,4·10 ⁻²	3,0·10 ⁻²	5,7·10 ⁻²	5,70	0,18	1,8·10 ⁴
2,5·10 ⁻²	3,6·10 ⁻²	5,8·10 ⁻²	3,11	0,39	1,4·10 ⁴
2,4·10 ⁻²	4,0·10 ⁻²	5,8·10 ⁻²	2,89	0,06	1,05·10 ⁵

Анализ данных таблицы показывает, что увеличение парциального давления хладона-14 способствовало существенному улучшению электрофизических параметров слоев. Диэлектрическая проницаемость существенно снижалась до ε = 2,89 при давлении хладона 4,0·10⁻² Па, диэлектрические потери – до tgδ = 0,06, а

удельное объемное сопротивление возросло более, чем в 5 раз.

Спектры оптического пропускания и поглощения в диапазоне $\lambda = 350\text{--}900$ нм определялись при помощи спектрофотометра МС-121. На рисунке 2 приведены спектры оптического пропускания и поглощения покрытий SiOF, нанесенных при различных парциальных давлениях хладона.

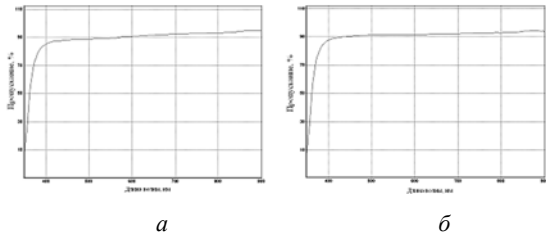


Рисунок 2 – Спектры оптического пропускания и поглощения покрытий SiOF, нанесенных при давлении хладона $3,0 \cdot 10^{-2}$ Па (а) и $4,0 \cdot 10^{-2}$ Па (б)

Покрyтия имели прозрачность около 90 % в широком диапазоне частот, что свидетельствует об их высоком качестве. Установлено, что повышение давления хладона способствует небольшому повышению пропускания.

Нагрев подложки приводил к улучшению оптических характеристик пленок SiOF. Так при температуре подложки 453 К увеличилось пропускание в видимой и ИК областях спектра (рисунк 3).

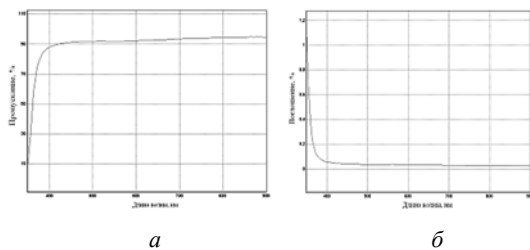


Рисунок 3 – Спектры оптического пропускания (а) и поглощения (б) покрытий SiOF, нанесенных при давлении хладона $3,6 \cdot 10^{-2}$ Па и температуре подложки 453 К

На рисунке 4 приведены зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса диэлектрических потерь от температуры подложки $T_{\text{п}}$. Парциальное давление хладона-14 составляло $3,6 \cdot 10^{-2}$ Па. Установлено, что эти зависимости имеют экстремумный характер. Лучшие параметры слоя SiOF имели при $T_{\text{п}} \sim 450\text{--}470$ К. Зависимость удельного объемного сопротивления от $T_{\text{п}}$ также носила похожий характер. Максимальное значение $\rho_v = 1,63 \cdot 10^5$ Ом·м было достигнуто при нагреве подложки до 453 К.

С целью идентификации состава полученных пленок проводились измерения ИК спектров пропускания (рисунк 5). Спектры регистрировались в спектральной области 2 000–

400 см^{-1} . В этом диапазоне все полученные пленки имели три характерные полосы поглощения: полосу около $\nu_s = 800 \text{ см}^{-1}$, соответствующую валентным симметричным колебаниям $\text{Si} \rightarrow \text{O} \leftarrow \text{Si}$; полосу около $\nu_{as} = 1085 \text{ см}^{-1}$, соответствующую валентным антисимметричным колебаниям $\text{Si} \leftarrow \text{O} \rightarrow \text{Si}$; полосу около $\delta_{as} = 450 \text{ см}^{-1}$, соответствующую деформационным дважды вырожденным колебаниям $\text{Si} \rightarrow \text{O} \leftarrow \text{Si}$. Также на спектре имеется четко выраженная полоса поглощения кремниевой подложки с частотой $\sim 607 \text{ см}^{-1}$. Установлено наличие полосы поглощения фторида кремния Si-F на частоте $\sim 935 \text{ см}^{-1}$. Наблюдались также полосы поглощения на связях C-H и C-O .

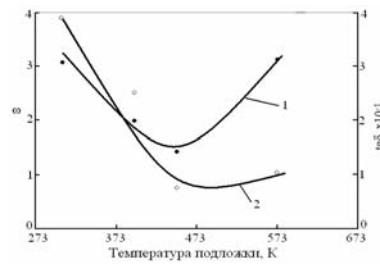


Рисунок 4– Зависимость диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь пленок SiOF от температуры подложки: 1 – ϵ ; 2 – $\text{tg} \delta$

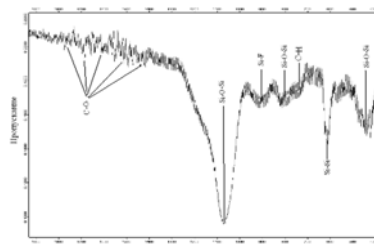


Рисунок 5 – ИК спектр пропускания покрытия SiOF, нанесенного при парциальном давлении хладона $3,0 \cdot 10^{-2}$ Па и температуре подложки 313 К

На рисунке 6 представлен ИК спектр пропускания покрытия SiOF, полученного при температуре подложки 453 К и парциальном давлении хладона $3,6 \cdot 10^{-2}$ Па.

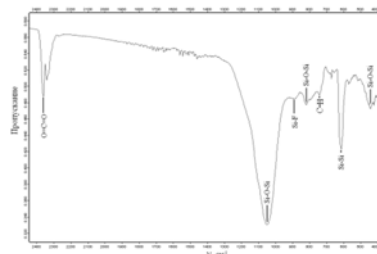


Рисунок 6 – ИК спектр пропускания покрытия SiOF, нанесенного при температуре подложки 453 К и парциальном давлении хладона $3,6 \cdot 10^{-2}$ Па

Установлено снижение интенсивности полосы поглощения фторида кремния Si-F на частоте $\sim 935 \text{ см}^{-1}$, что можно объяснить десорбцией фто-

ра. Нагрев подложки приводил к снижению поглощения на связях C–O и , наоборот, росту поглощения на связи O=C=O.

Литература

1. Murarka S.P. Low dielectric constant materials for interlayer dielectric application / S.P. Murarka //Solid State Technology. 1996. – № 3. – P. 83–89.

2. Телеш Е.В. Формирование оптических покрытий прямым осаждением из ионных пучков / Е.В. Телеш, Н.К. Касинский // Контенант, 2014. – Т. 13. – № 2. – С. 27–30.

3. Телеш Е.В. Применение вторичного разряда в ускорителе с анодным слоем для формирования оптических покрытий из диоксида кремния / Е.В. Телеш, А.П. Достанко // Контенант. – 2014. – Т. 13. – № 2. – С. 31–33.

УДК 621.382.002

СИНТЕЗ ПЛЕНОК НИТРИДА УГЛЕРОДА ПРЯМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ИОННЫХ ПУЧКОВ

Телеш Е.В., Романович Я.Г.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Минск, Республика Беларусь

Ранее было установлено, что β - C_3N_4 , аналогичный β - Si_3N_4 , может обладать твердостью, сравнимой с твердостью алмаза. Дальнейшие расчеты показали, что другие кристаллические фазы C_3N_4 должны иметь стабильность, сравнимую или большую, чем стабильность β - C_3N_4 , и что многие из этих структур должны быть твердыми по природе. C_3N_4 -структуры включают α -, β -, кубический, псевдокубический и графитообразный нитрид углерода. Пленки из нитрида углерода обладают высокой износостойкостью и устойчивостью к царапанию, являются коррозионностойкими и более устойчивыми к воздействию высоких температур по сравнению с алмазоподобными покрытиями [1].

Тонкие пленки нитрида углерода имеют широкий спектр применений. Например, их используют в качестве защитных покрытий для жестких дисков. Покрытия из нитрида углерода могут использоваться для таких областей применения, как износостойкие и противокоррозионные покрытия, в качестве диэлектрических слоев в микроэлектронных устройствах, как оптические покрытия [2, 3]. Такие пленки получают в основном реактивным испарением или распылением графита в среде азота. Нами предложен новый метод синтеза пленок нитрида углерода – прямое осаждение из ионных пучков, формируемых ускорителем с анодным слоем в режиме ионно-пучкового фокуса [4].

Проведено исследование влияния состава рабочего газа, напряжения на диафрагме и температуры подложки на электрофизические и механические характеристики покрытий из нитрида углерода, полученных осаждением из вторичного ионного пучка, формируемого ускорителем с анодным слоем в режиме ионно-пучкового фокуса. Экспериментальные исследования проводили на установке ВУ-1А, оснащенной ионным источником на основе ускорителя с анодным слоем (рисунок 1). В качестве рабочих газов использовались метан и азот. Покрытия наносились на

неподвижные подложки из кремния и стекла. Остаточное давление составляло $\sim 3,5 \cdot 10^{-3}$ Па, ускоряющее напряжение – (2,3–2,4) кВ, ток разряда – 75–80 мА. Толщина покрытий определялась с помощью микроскопа-интерферометра МИИ-4. Скорость нанесения изменялась в диапазоне 0,1–0,16 нм/с и зависела от парциального давления азота и напряжения на диафрагме. Электрофизические параметры пленок (удельное объемное сопротивление ρ_v , тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$) покрытий осуществляли путем измерения характеристик структур металл–пленка нитрида углерода–кремний. Металлические контакты диаметром 0,35 мм формировались путем напыления через маску пленки никеля толщиной $\sim 0,2$ мкм. Сопротивление и $\text{tg}\delta$ тестовых структур измерялись с помощью измерителя иммитанса Е7-20 на частоте 1 МГц. Результаты исследования влияния режимов синтеза на электрофизические параметры слоев приведены в таблице.



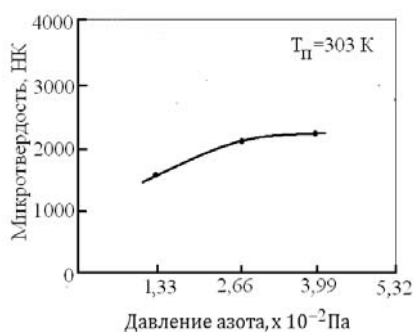
Рисунок 1 – Внешний вид внутрикопачного объема установки ВУ-1А

Измерение электрофизических характеристик показало, что покрытия обладали удельным объемным сопротивлением в широком диапазоне от $0,65 \cdot 10^4$ до $3,5 \cdot 10^5$ Ом·м. Тангенс угла диэлектрических потерь изменялся от 0,04 до 0,40. Увеличение парциального давления азота способствовало увеличению ρ_v и снижению диэлектрических потерь. Наилучшие параметры были

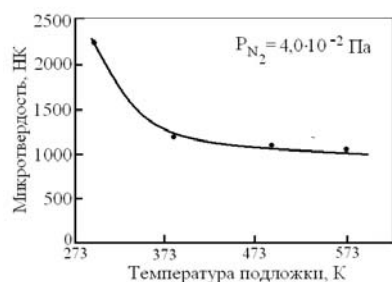
получены при парциальном давлении азота $4,0 \cdot 10^{-2}$ Па. Нагрев подложки неоднозначно влиял на вышеуказанные параметры. При температуре подложки 573 К были достигнуты минимальное значение $\text{tg}\delta = 0,04$ и $\rho_v = 1,4 \cdot 10^5$ Ом·м. При наличии напряжения на диафрагме $U_d = 85$ В удалось синтезировать покрытия с наилучшими электрофизическими характеристиками.

Таблица 1 – Исследования влияния режимов синтеза на электрофизические параметры слоев нитрида углерода

Давление азота, Па	Рабочее давление, Па	U_d , В	T_n , К	ρ_v , Ом·м	$\text{tg}\delta$
–	$8,1 \cdot 10^{-2}$	–	303	$2,0 \cdot 10^5$	0,055
$1,3 \cdot 10^{-2}$	$8,2 \cdot 10^{-2}$	–	303	$0,65 \cdot 10^4$	0,39
$2,6 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$	–	303	$0,88 \cdot 10^4$	0,40
$4,0 \cdot 10^{-2}$	$8,2 \cdot 10^{-2}$	–	303	$2,3 \cdot 10^5$	0,05
$4,0 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$	–	393	$9,8 \cdot 10^4$	0,11
$4,0 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$	–	483	$7,0 \cdot 10^4$	0,26
$4,0 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$	–	573	$1,4 \cdot 10^5$	0,04
$4,0 \cdot 10^{-2}$	$8,2 \cdot 10^{-2}$	45	303	$3,0 \cdot 10^4$	0,26
$4,0 \cdot 10^{-2}$	$8,2 \cdot 10^{-2}$	85	303	$3,5 \cdot 10^5$	0,04



а



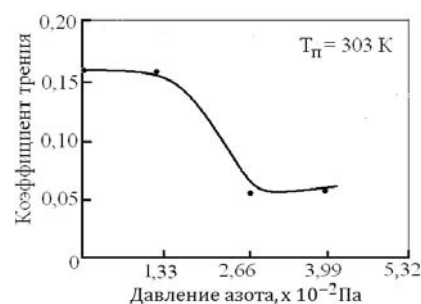
б

Рисунок 2 – Зависимости микротвердости пленок нитрида углерода от парциального давления азота (а) и температуры подложки (б)

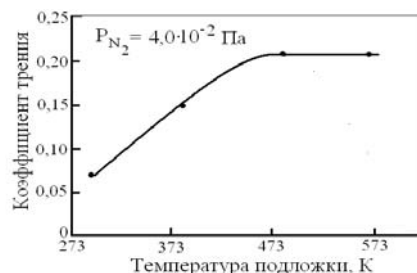
Полученные пленки исследовались на микротвердость по шкале Кнуппа с использованием твердомера VMHT MOT фирмы Leica. На рисунке 2 представлены зависимости микротвердости пленок от парциального давления азота и темпе-

ратуры подложки. Микротвердость незначительно зависела от парциального давления азота. Максимальная микротвердость 2260 НК была получена при давлении азота $4,0 \cdot 10^{-2}$ Па. Повышение температуры подложки приводило к монотонному снижению микротвердости. Это можно объяснить десорбцией азота из конденсирующегося покрытия. При напряжении на диафрагме 55 В была получена максимальная микротвердости 2424 НК.

Трибологические характеристики измерялись с использованием микротвердомера МТ-4. В качестве индентора применяли шарик из стали ШХ15 диаметром 4 мм. Нагрузка в условиях сухого трения составляла 0,5 Н. Установлено, что увеличение доли азота снижает значение коэффициента трения почти в 3 раза (рисунок 3, а).



а



б

Рисунок 3 – Зависимости коэффициента трения пленок нитрида углерода от парциального давления азота (а) и температуры подложки (б)

Нагрев подложки способствовал значительному ухудшению трибологических характеристик покрытий (рисунок 3, б). Это также можно связать с десорбцией азота их конденсирующегося на подложке покрытия. Увеличение потенциала на мишени с нуля до 110 В привело к росту коэффициента трения с 0,07 до 0,21.

Адгезия покрытий из нитрида углерода к стеклу и кремнию определялась методом поперечных насечек. Установлено, что покрытия, нанесенные на холодную и подогретую до 423 К подложки имели отличную адгезию, соответствующую 5В по шкале ASTM. Покрытия, полученные при $U_d = 60$ –110 В и $T_n = 303$ К, обладали неудовлетворительной адгезией, соответствующей 0–2 В по шкале ASTM.

Литература

1. Takadoun J. Comparative study of mechanical and tribological properties of CN_x and DLC films deposited by PECVD technique / J. Takadoun, J.M. Rauch, L.M. Cattenot, N. Martin // Surface and Coating Materials Technology. – 2003. – V. 174–175. – P. 427–433.
 2. Cohen M.L. Structural, electronic and optical properties of carbon nitride / M.L. Cohen // Material Science Engineering A. – 1995. – V. 209. – P. 1–4.

3. Khurshudov A.G. Tribological properties of carbon nitride overcoat for thin-film magnetic rigid disks / A.G. Khurshudov, K. Kato // Surface and Coatings Technology. – 1996. – V. 9. – P. 537–542.

4. Телеш Е.В. Оптические характеристики тонких пленок диоксида кремния, полученных прямым осаждением из ионных пучков / Е.В. Телеш, А.П. Достанко, А.Ю. Вашуров // Доклады БГУИР. – № 8(94). – С. 81–85.

УДК 531.746

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОРСИОННЫХ ПОДВЕСОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МЭМС-ДАТЧИКА УГЛА НАКЛОНА

Федькин В.А., Таратын И.А., Плескачевский Ю.М.

*Белорусский национальный технический университет
 Минск, Республика Беларусь*

Для определения угла наклона различных объектов относительно гравитационного поля Земли используется прибор, который называется инклинометр [1].

Инклинометрия является перспективным направлением для научно-технических разработок, которая включает в себя множество современных разработок из таких научных областей, как математика, электроника, гироскопия и микроэлектромеханические системы (МЭМС).

С развитием технологий инклинометрия получила широкое распространение в строительстве для определения отклонений от горизонтали различных объектов.

Другими важными задачами являются минимизация габаритов прибора для удобства использования и его эргономика.

На сегодняшний момент для минимизации габаритов прибора используют микромеханические электронные компоненты, так называемые МЭМС-системы.

МЭМС-системы представляют собой устройства, которые объединяют в себе микромеханические и микроэлектронные компоненты [2].

Инклинометры на основе микромеханического акселерометра обладают уникально малыми массой и габаритами, низким потреблением электроэнергии, полным отсутствием подвижных узлов, возможностью функционирования в повседневных условиях эксплуатации и меньшей стоимостью, чем их традиционные аналоги.

Инклинометры находят широкое применение в различных сферах. В зависимости от сферы использования, инклинометры могут быть разных видов, структуры и содержать различные вспомогательные устройства. Микромеханический акселерометр входит в состав инерциального измерительного модуля, который предназначен для измерения угла поворота различных объектов.

Основным недостатком автономного инерциального измерительного модуля является накопление ошибки спустя некоторого времени рабо-

ты устройства. Накопление ошибки связано с дрейфом нуля и шумами акселерометра.

Для устранения выше перечисленных погрешностей необходимо использовать точную модель МЭМС-акселерометра.

На первом этапе производится цикл модального анализа для подбора собственных частот микромеханического устройства. Меняются параметры геометрии в программе SOLIDWORKS 2019 и подготавливается импортируемая модель в ANSYS – производится модальный анализ. Цикл повторяется до получения необходимых значений собственных частот. После подбора собственных частот можно производить температурный анализ.

Создание геометрических моделей торсионных подвесов акселерометров производилось в программе SOLIDWORKS 2019.

На основании библиотеки торсионных подвесов были созданы 6 параметрических 3D-моделей.

Моделирование влияния размеров торсионных подвесов, проводилось по методике, которая изображена на рисунке 1.

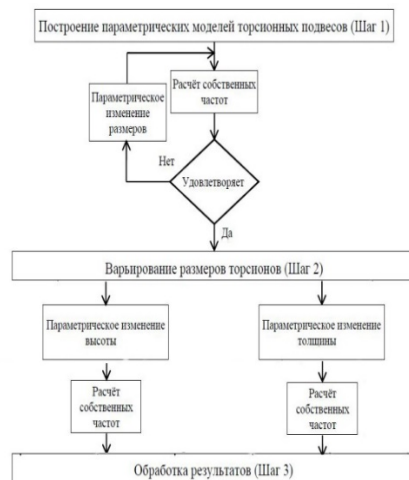


Рисунок 1 – Алгоритм оптимизации торсионных подвесов

Первым шагом является построение модели торсионного подвеса это является основой для проведения конечно-элементарного анализа. Изменения размеров торсиона задаются в некотором диапазоне, поэтому создаётся его модель, для построения которой была выбрана программа SOLIDWORKS 2019, которая позволяет описать конструкцию объекта различным набором размерных характеристик, определяющих геометрию объекта.

Модель позволяет быстро изменить один или несколько размеров конструкции, что значительно сокращает время на проведение расчётов. Каждому элементу построения присваивается своё уникальное имя параметра, а затем этому параметру присваивается численное значение. При изменении значения данного параметра будет автоматически пересчитываться 3D-модель торсиона.

Результаты будут приведены для шести типов торсионов. Все исследуемые торсионы с одной стороны закреплялись полностью. Такое закрепление позволяет имитировать поведение торсионного подвеса при использовании его в реальной конструкции, в которой торсион одним концом крепится к неподвижному основанию, а вторым концом к подвижному элементу. Начальные значения собственных частот торсионов подбирались таким образом, чтобы они имели близкие значения для последующего сравнения результатов. Материал торсионов – монокристаллический кремний.

Второй шаг состоит в определении влияния размеров на собственные частоты торсионного подвеса, поочерёдно осуществляется изменение одного размера при постоянстве всех остальных, изображено на рисунке 2, и определяются соответствующие им изменения собственных частот, форм колебаний торсионов.

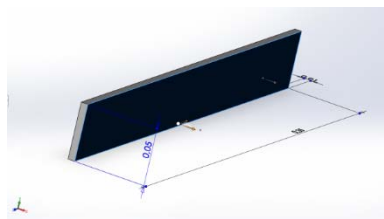


Рисунок 2 – Варьируемые размеры торсионных подвесов

На рисунке 3 показана 3D-модель торсиона 1 с наложенной на него сеткой, с максимальным разрешением. Аналогичным образом сетка строилась и для остальных типов торсионов.

В результате получается объёмная модель с равномерно наложенной сеткой, что позволяет точнее определить требуемые параметры.

В гироскопах и акселерометрах обычно рабочей является первая форма колебаний, все

остальные частоты должны быть существенно выше. На рисунке 4 приведена первая форма собственных колебаний торсиона.

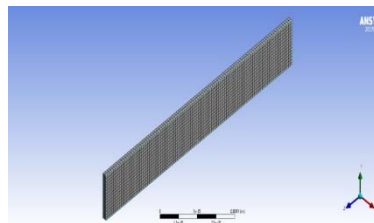


Рисунок 3 – 3D-модель торсиона 1 с сеткой

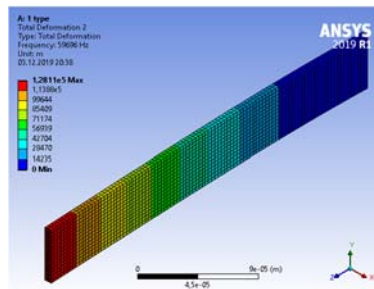


Рисунок 4 – Собственная форма колебаний торсиона 1

При первой форме колебаний торсион 1 совершает поступательные перемещения вдоль оси X.

Результаты собственных колебаний торсионов представлены в таблице 1

Таблица 1 – Результаты собственных колебаний торсионов

Тип торсиона	Мода 1 f, Гц	Мода 2 f, Гц	Мода 3 f, Гц
1	$0,5970 \cdot 10^5$	$0,3736 \cdot 10^6$	$0,4888 \cdot 10^6$

Заключение. Проведённые исследования показали, что изменение высоты торсионов практически не оказывает влияния на изменение частоты первой формы колебаний. Максимальное изменение частоты f3 наблюдается у 1-го торсиона. Наибольшей стабильностью обладают частоты 4-го торсиона и у данного типа торсиона есть существенное преимущество по сравнению с остальными, он имеет наименьшую длину (200 мкм), что существенно может снизить габаритные размеры конструкции, в которой он будет применяться.

Литература

1. Определение угла наклона акселерометром. // <http://bitaks.com/> [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://bitaks.com/resources/inclinometer/content> Дата доступа: 12.10.2020.
2. Саленко Д.С. История развития и области применения технологии MEMS / Д.С. Саленко // Автоматика и программная инженерия. – 2013. – Вып. 1. – № 3.

УДК 621.793.182

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НИТРИДА ВАНАДИЯ

Хабарова А.В.¹, Кузнецова Т.А.^{1,2}, Лапицкая В.А.^{1,2}, Куприн А.С.³, Чижик С.А.^{1,2}, Трухан Р.Э.^{1,2}

¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

³ННЦ Харьковский физико-технический институт НАН Украины
Харьков, Украина

Упрочняющие покрытия являются последние десятилетия неотъемлемой частью техники и применяются для защиты поверхностей деталей в самых различных областях. Перспективность применения нитридных, карбидных, карбонитридных, оксикарбонитридных покрытий на основе металлов IV–VI подгрупп Периодической системы элементов в качестве износостойких слоев определяется высокой твердостью при повышенных температурах, химической инертностью, жаро- и коррозионностойкостью. Наиболее часто используемыми в промышленности и наиболее исследованными являются нитриды титана, хрома и TiAlN. Одним из недостатков этих покрытий является достаточно высокий коэффициент трения, что вызывает их преждевременный износ. Одним из путей решения этой проблемы является легирования нитридных покрытий элементами, не образуют устойчивых оксидов (V, Mo, W). Неустойчивые оксиды образуют так называемые фазы Магнели (упорядоченные плоскости кристаллографического сдвига), которые выступают в качестве аналога твердой смазки.

Синтез и свойства магнетронных покрытий системы VN достаточно подробно изучены в работах [1–3]. Однако в патентной и научно-технической литературе отсутствуют сведения о комплексном анализе свойств вакуумно-дуговых нитридных и оксинитридных покрытий на основе переходных металлов (V, Nb, Zr), учитывающие локальные физико-механические свойства.

Целью выполнения работы является подбор оптимальных параметров нанесения износостойких покрытий нитрида ванадия вакуумно-дуговым осаждением для усовершенствования механических свойств покрытий.

Уникальные возможности вакуумно-дугового осаждения обусловлены особенностями используемой в нем вакуумной дуги как основного технологического инструмента. Разряд в парах металла, из которого изготовлен катод, генерирует потоки высокоионизованной плазмы с энергией ионов в десятки электронвольт. Это, в свою очередь, обеспечивает возможность синтезировать покрытия с заданными физико-механическими, химическими и эксплуатационными характеристиками. Применение технологии вакуумно-дугового осаждения позволит

сформировать соединения VN широкого стехиометрического состава и наноразмерного масштаба. Это позволит получить покрытия с поверхностным слоем, состоящим из различных оксидных, нитридных, оксинитридных наноразмерных фаз, в том числе и фаз Магнели. Используемый подход даст более широкие возможности для изменения свойств поверхности под воздействием температуры при эксплуатации.

Износостойкие покрытия VN были сформированы и нанесены методом вакуумно-дугового осаждения в системе Булат 3-Т на подложки из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 32 мм. Химический состав подложки: С – 0,9 %, W – 6,4 %, Mo – 5%, V – 1,9 %, Cr – 4,2 %, Mn – 0,3 %, Si – 0,4 %, Fe – 80,9 %. Подложки полировали до Ra = 0,02 мкм, химически обезжирили и в течение 10 минут промывали в горячей щелочной ультразвуковой ванне. Затем сушили горячим воздухом. Диаметр чистых ванадиевых (99,99 %) катодов, расположенных на противоположных сторонах камеры, составлял 100 мм.

Подложку помещали во вращающийся держатель (30 об/мин) в вакуумной камере на расстоянии 30 см от источника дуги. Систему осаждения вакуумировали до давления $2 \cdot 10^{-3}$ Па. Следующим этапом был дополнительный нагрев при ионной бомбардировке ионами аргона и ванадия в атмосфере чистого газообразного азота с давлением 0,5 Па. Ток дуги, отрицательное напряжение смещения подложки и время травления составляли: 90 А, –1 300 В и 3 мин соответственно. В начале осаждения тонкий слой ванадия (0,1 мкм) наносился в качестве адгезионного слоя при напряжении –100 В в течение 5 мин. Затем смесь технологических газов заменяли чистым азотом с контролируемым давлением: 0,001, 0,03, 0,07, 0,2, 0,5, 0,8, 1,5 и 3 Па. Покрытие VN наносилось с использованием тока дуги 90 А, отрицательного напряжения смещения подложки –100 В и времени осаждения 25 мин при температуре 400 °С. После чего образцы охлаждали до температуры около 100 °С.

Контроль механических свойств износостойких покрытий проводили путем внедрения алмазной пирамиды Берковича с непрерывной регистрацией деформационных кривых на наноинденторе модели 750 Ubi (Hysitron, США) в

режиме «10 с нагружение, 10 с разгрузку». В качестве параметров механических свойств покрытий определялись модуль упругости E , микротвердость H , упругая и пластическая составляющие деформации (%), индекс пластичности H/E и сопротивление пластической деформации H^3/E^2 . Упругая и пластическая составляющие деформации были получены как отношение площади, ограниченной кривыми нагрузки и разгрузки, к полной работе индентирования. Данные получены на основе кривых наноиндентирования (рисунок 1).

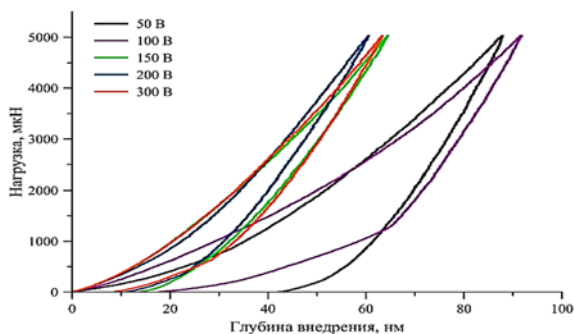


Рисунок 1 – Вид упругого восстановления для покрытий VN, полученных при различном отрицательном напряжении смещения на подложке

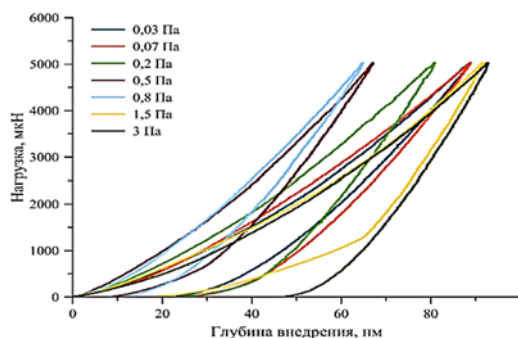


Рисунок 2 – Вид упругого восстановления для покрытий VN, полученных при различном давлении азота в камере

Износостойкое покрытие VN, полученное при параметрах $P_{N_2} = 0,5$ Па и $U = -100$ В, имеет самое высокое среди исследованных образцов значение микротвердости $H = 41,42 \pm 6,17$ ГПа, индекс пластичности $H/E = 0,107$ и сопротивление пластической деформации $H^3/E^2 = 0,470$, при толщине покрытия 3,7 мкм. Соотношение H/E характеризует устойчивость материала к упругой деформации. Более высокое значение соотношения H^3/E^2 позволяет оценить способность мате-

риала рассеивать энергию при пластической деформации во время нагружения.

Следует отметить, что деформационное поведение покрытия VN, полученного при значении $N_2 = 0,001$ Па, имеет высокое значение глубины внедрения и малые $H/E = 0,021$ и $H^3/E^2 = 0,0002$, что соответствует вариантам покрытий с высоким показателем пластичности $\eta_{\text{plast}} = 83,21 \pm 8,32$ %, но с малой прочностью $H = 0,48 \pm 0,23$ ГПа и $E = 22,58 \pm 25,71$ ГПа.

Оптимизация режимов нанесения выполнялась по комплексу механических свойств покрытий с элементами серого реляционного анализа. Помимо традиционной микротвердости в комплекс параметров для оценки режимов нанесения входили характеристики пластичности, которые позволяют снизить напряжения в покрытии и избежать катастрофического распространения трещин под воздействием нагрузки.

На основании полученных экспериментальных результатов механических свойств покрытий была проведена оптимизация режимов напыления (давления газа в камере P_{N_2} , величины напряжения смещения на подложке U) по критерию: «чем выше E , H , H/E , H^3/E^2 и пластическое восстановление, тем лучше». Дополнительным критерием было выбрано: «чем меньше толщина покрытия, тем лучше».

Результаты расчетов показывают, что оптимальными режимами напыления покрытия является: давление азота в камере $P_{N_2} = 0,5$ Па и напряжение смещения на подложке $U = -100$ В. Толщина покрытия при этом составляет $h = 3,7$ мкм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Т20УКА-030.

Литература

1. Fangfang Ge. Achieving very low wear rates in binary transition-metal nitrides: The case of magnetron sputtered dense and highly oriented VN coatings / Fangfang Ge, Ping Zhu, Fanping Meng, Qunji Xue, Feng Huang // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 248. – P. 81–90.
2. Voevodin A.A. Hard coatings with high temperature adaptive lubrication and contact thermal management: review / A.A.Voevodin, C.Muratore, S.M.Aouadi // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 257. – P. 247–265.
3. Franz R. Vanadium containing self-adaptive low-friction hard coatings for high-temperature applications: A review / R. Franz, Ch. Mitterer // Surface and Coatings Technology. – 2013. – Vol. 228. – P. 1–13.

УДК 621.382

**АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ
БИПОЛЯРНОГО *n-p-n* ТРАНЗИСТОРА**

**Оджаев В.Б.¹, Петлицкий А.Н.², Просолович В.С.¹, Филипеня В.А.², Шестовский Д.В.²,
Черный В.В.³, Явид В.Ю.¹, Янковский Ю.Н.¹**

¹Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

²Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Республика Беларусь

³Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Статический коэффициент усиления по току биполярных транзисторов (β) определяет усиленные свойства, как отдельного прибора, так и схемы в целом. Авторами [1] показано, что влияние глубоких рекомбинационных центров (ГРЦ) наиболее существенно проявляется при низких ($I_c < 10^{-6}$ А) уровнях инжекции вследствие увеличения темпа рекомбинации носителей в эмиттерном переходе. В связи с этим актуальным является выявление причин лабильной воспроизводимости основных характеристик биполярных *n-p-n*-транзисторов для выявления основных факторов, определяющих стабильность параметров приборов и поиска путей минимизации отрицательных эффектов.

Проведены исследования температурных зависимостей β в интегральных схемах, сформированных по аналогичным технологическим маршрутам (серии *A* и *B*) с использованием идентичных материалов методом измерения ВАХ в интервале температур 20–125 °С. Содержание технологических примесей (ТП) на поверхности пластин Si исследовалось методом полного внешнего отражения рентгеновского излучения. В приборах серии *A* оно было ниже предела обнаружения (по Fe $< 4,0 \cdot 10^9$ ат./см²), а в серии *B* концентрация Fe = $3,4 \cdot 10^{11}$ ат./см², также обнаружены Cl, K, Ca, Ti, Cr, Cu, Zn.

Ранее было установлено [1], что в приборах серии *B* при среднем уровне тока коллектора ($10^{-6} < I_c < 10^{-3}$ А) β в схеме с общим эмиттером превышает соответствующее значение в приборах серии *A*. При $I_c < 10^{-6}$ А β для серии *B* становится существенно меньше I_c для серии *A*. Температурные зависимости β , представленные на рисунке 1, *a* и *б*, в данных областях также существенно различаются. Расчеты показали, что для серии *B* при $I_c = 10^{-4}$ А температурное изменение β ($\partial\beta/\partial T$) составляет $0,49$ °С⁻¹, а для серии *A* = $0,39$ °С⁻¹. При снижении I_c до 10^{-6} А для серии *B* β становится значительно меньше значений чем для серии *A*. В данной области β для серии *B* практически не зависит от температуры. При снижении I_c от 10^{-4} до 10^{-7} А $\partial\beta/\partial T$ для серии *A* уменьшается от $0,39$ до $0,34$ °С⁻¹, а в серии *B* от $0,49$ до $0,02$ °С⁻¹.

Согласно [2] в биполярном транзисторе с шириной $W < 0.1 L_B$ при условии, что коэффициент переноса инжектированных носителей в

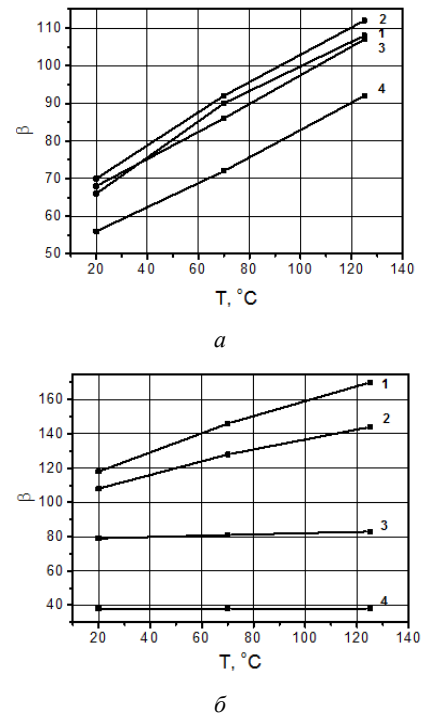


Рисунок 1 – Температурные зависимости β транзисторов серии *A* (*a*) и серии *B* (*б*)
 I_c , А: 1 – 10^{-4} ; 2 – 10^{-5} ; 3 – 10^{-6} ; 4 – 10^{-7}

базе $\alpha_T \approx 1$, β практически полностью определяется эффективностью эмиттера γ

$$\beta \approx \frac{\gamma}{1 - \gamma} \frac{N_E}{N_B W} = \frac{N_E}{Q_b}, \quad (1)$$

где N_B и N_E – концентрация легирующей примеси в базе и эмиттере соответственно, Q_b – число Гуммеля, количество примеси на единицу площади базы.

Для эффективности эмиттера справедливо соотношение [2]

$$\frac{\gamma n_B}{p_E \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right)}, \quad (2)$$

где ΔE_g – изменение ширины запрещенной зоны, зависящее как от температуры, так и от концентрации свободных носителей заряда. Из (1) следует, что β будет тем выше, чем сильнее легирован эмиттер, и иметь такую же температурную

зависимость, как и γ . Поэтому β также будет пропорционален $\exp(-\Delta E_g/kT)$.

Для умеренно и слаболегированных эмиттеров (концентрация ниже 10^{18} см^{-3}) величина ΔE_g достаточно мала и так же минимально влияние температуры на значение β . Расчеты показали, что ΔE_g при 20°C в эмиттере, ответственное за рост β , равно 36 и 48 мэВ в приборах из партий *A* и *B*, соответственно. Сопоставив расчетные значения ΔE_g , была оценена N_E . Для партии *A* – $N_E \approx 1,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а для партии *B* – $N_E \approx 4,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Таким образом, при $I_c = 10^{-4} \text{ А}$, большее значение β для серии *B* обусловлено более высокой N_E , несмотря на повышенное содержание ТП. Это связано и с более сильной температурной зависимостью β в данной области. Для серии *A* с низким содержанием фоновых ТП при $I_c < 10^{-6} \text{ А}$ температурная зависимость β практически не отличается от аналогичной зависимости для среднего уровня инжекции. Таким образом, при малых I_c из-за существенного вклада ГРЦ в обедненной области эмиттера и поверхностных токов утечки в транзисторах из партии *B* эффект влияния температуры на величину β существенно выше, чем в партии *A*.

Наиболее чувствительными величинами к загрязнению ГРЦ, оказывающими влияние на β , являются отношения $p_E/n_B \approx N_B/N_E$ и W/L_B . Требуемое соотношение N_B/N_E , выбирается исходя от оптимальной N_E , при которой влияние Оже-рекомбинации [2] и изменения β с температурой будут минимальны. В свою очередь, N_B будет детерминирована величиной N_E , с учётом требуемого значения сопротивления базы r_B .

На рисунке 2 показана расчетная зависимость β от величины отношения N_B/N_E для *n-p-n* транзистора. Расчет проводился для 20°C при $N_E = 7,11 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ($\Delta E_g = 60 \text{ мэВ}$) и $W/L_B = 0,1$. Другим важным фактором, определяющим β , является отношение толщины базы к диффузионной длине неосновных носителей в базе W/L_B .

На рисунке 3 показана расчетная зависимость β от величины отношения W/L_B для *n-p-n* транзистора. Расчет проводился для 20°C при $N_E = 7,11 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ($\Delta E_g = 60 \text{ мэВ}$) и $N_B/N_E = 9,29 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-3}$. При топологии интегральной схемы БИКМОП $W = \text{const}$ и отношение W/L_B будет полностью определяться диффузионной длиной, связанной, в свою очередь, со временем жизни электронов τ_n в базе *n-p-n* транзистора соотношением $L_B = (D_n \cdot \tau_n)^{1/2}$. Поэтому, весьма эффективными методами являются проведение входного контроля исходных материалов и соблюдение технологической гигиены в процессе создания ИС.

Установлено, что в биполярном *n-p-n* транзисторе с высоким содержанием фоновых ТП для увеличения β необходима более высокая концентрация основной легирующей примеси в эмиттере по сравнению с приборами, с низким содержанием фоновых ТП. Данное обстоятельство обуславливает и более сильную температурную зависимость β вследствие значительного вклада в его величину температурного изменения ширины запрещенной зоны в сильнолегированном кремнии.

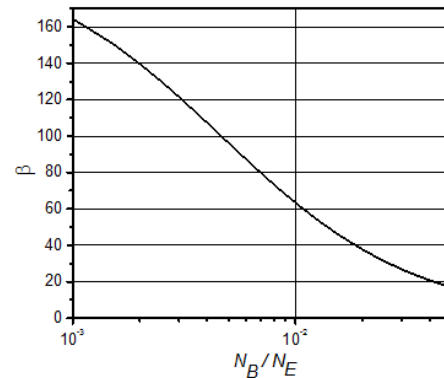


Рисунок 2 – Зависимость β от величины отношения N_B/N_E для *n-p-n* транзистора

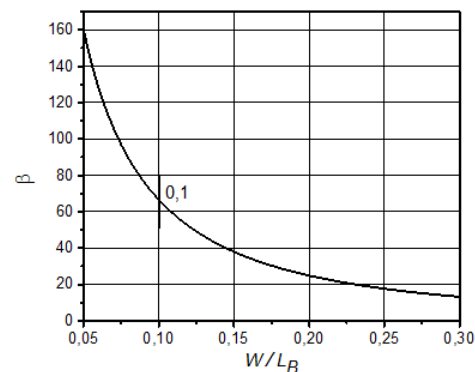


Рисунок 3 – Зависимость β от величины отношения W/L_B для *n-p-n* транзистора

Литература

- Оджаев В.Б. Зависимость коэффициента усиления биполярного *n-p-n* транзистора от параметров легированных областей и содержания технологических примесей / В.Б. Оджаев, А.К. Панфиленко, А.Н. Петлицкий, В.А. Пилипенко, В.С. Просолович, В.А. Филипеня, В.Ю. Явид, Ю.Н. Янковский // Материалы VIII Международной научной конференции «Материалы и структуры современной электроники». Минск. – 2018. – С. 195–199.
- Sze S.M. Semiconductor Devices: Physics and Technology / S.M. Sze, M.K. Lee – 3rd ed. – John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited, 2012. – 582 p.

УДК 621.382

ВЛИЯНИЕ γ -ОБЛУЧЕНИЯ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ p - i - n -ФОТОДИОДОВ

Горбачук Н.И.¹, Ластовский С.Б.², Оджаев В.Б.¹, Петлицкий А.Н.³, Просолович В.С.¹, Ковальчук Н.С.³, Филипеня В.А.³, Черный В.В.⁴, Шестовский Д.В.³, Янковский Ю.Н.¹

¹Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

²Научно-практический центр по материаловедению НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

³Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Республика Беларусь

⁴Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Простота конструкции, низкая стоимость и возможность изготовления прибора с оптимальными характеристиками обуславливают применение p - i - n фотодиодов в аппаратуре космического назначения в качестве навигационных и сенсорных детекторов оптического и ИК диапазона, в системах LIDAR [1], а также в оптических межспутниковых каналах связи [2], где они подвержены воздействию солнечной радиации. В работе исследовано влияние γ -излучения на электрофизические параметры p - i - n фотодиодов на основе кремния с вертикальной структурой и охранным кольцом.

Приборы изготавливались на пластинах кремния p -типа проводимости ориентации (100) с $\rho = 1000$ Ом·см, выращенных методом бестигельной зонной плавки. Область p^+ -типа анода (изотипный переход) создавалась имплантацией ионов B^+ во всю поверхность непланарной стороны пластины, области катода n^+ -типа и охрannого кольца – диффузией P из газовой фазы в планарную сторону пластины. Облучение γ -квантами производилось от источника ^{60}Co дозой 10^{15} квант/см². Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) производились в диапазоне температур -30 – 70 °C с шагом 10 °C. Время жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ) определялось из переходных характеристик p - i - n фотодиода при комнатной температуре согласно методике [5]. Определение локальных дефектов в приповерхностной фоточувствительной области производилось с помощью растрового электронного микроскопа «НИТАСНИ» типа S-4800 (РЭМ) согласно методике [6] в сканирующем режиме и в режиме наведенного тока с энергиями пучка 20 и 30 кэВ соответственно.

На рисунке 1 приведены ВАХ темновых токов фоточувствительной области и охрannого кольца исходного фотодиода до и после воздействия на образец γ -излучения. Для p - n перехода на основе кремния при 20 °C основной вклад в обратный ток вносит дрейфовая составляющая и токи утечки по поверхности [3]. Следует отметить, что на ВАХ диода при обратном смещении наблюдаются ступеньки вблизи $V_1^{bend} = 25$ В и $V_2^{bend} = 70$ В. Это обусловлено, вероятно, терми-

ческой генерацией носителей заряда с глубоких уровней. Данный факт так же позволяет сделать предположение о неоднородном распределении технологических примесей с глубокими уровнями по объему кристалла.

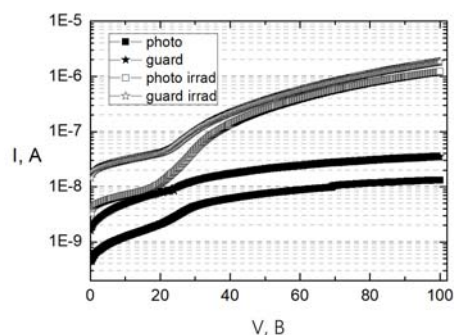


Рисунок 1 – Обратные ВАХ фоточувствительной области (photo) и охрannого кольца (guard) исходного фотодиода и после воздействия γ -излучения (photo irradiad, guard irradiad) при температуре 20 °C

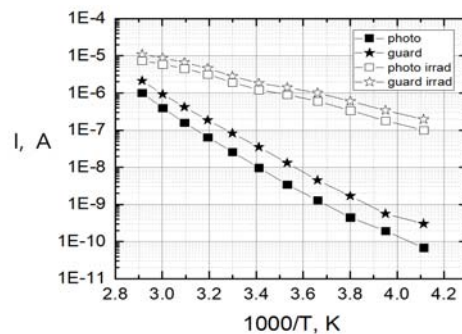


Рисунок 2 – Температурная зависимость тока при обратном смещении -100 В фоточувствительной области (photo) и охрannого кольца (guard) исходного p - i - n фотодиода и после воздействия γ -излучения (photo irradiad, guard irradiad)

На рисунке 2 приведены зависимости темновых токов от обратной температуры. Определенное по наклону температурной зависимости положение глубоких уровней в запрещенной зоне дало значения для фоточувствительной области – $E_v+0,38$ эВ, для охрannого кольца – $E_v+0,4$ эВ. Согласно [4] уровень $E_v+0,38$ эВ соответствует глубоким уровням атомов железа, находящихся в

междуузельном положении, попадающих в материал при проведении длительных (более 1 часа) диффузионных процессов при температурах 1 100–1 200 °С из атмосферы реактора и формирующих глубокие рекомбинационные уровни.

На всех изображениях РЭМ (рисунок 3) в фоточувствительных областях фотодиода не наблюдалось контрастов, свидетельствующих о наличии размерных дефектов, являющихся рекомбинационными центрами локальных дефектов вблизи металлургической границы p - n перехода. Значения времени жизни ННЗ (τ_c) для фоточувствительной области и охранного кольца необлученного p - i - n фотодиода составили 38,6 мкс и 32,23 мкс соответственно.

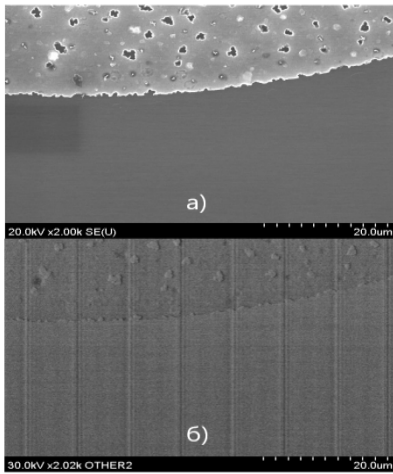


Рисунок 3 – Изображения приповерхностной фоточувствительной области p - i - n фотодиода полученные РЭМ в режиме сканирования (а) и в режиме наведенного тока (б)

Расчетные значения темновых токов при $V = -100$ В составили $I_{\text{dark}}^{\text{photo}} = 93$ нА, $I_{\text{dark}}^{\text{guard}} = 130$ нА, что примерно в 5 раз больше экспериментальных значений. Это обусловлено тем, что измерение τ_c производилось по переходным процессам в локальной области потенциального барьера при обратном смещении не более 4 В. Однако, в фотодиодном режиме τ_c определяется, преимущественно, объемным временем жизни в i -области, которое в используемом кремнии составляет сотни микросекунд.

После облучения p - i - n фотодиода наблюдается увеличение темнового тока (рисунок 1). Это связано с увеличением составляющей тока утечки, обусловленного генерацией носителей заряда с глубоких уровней радиационных дефектов. Так же возможно образование инверсионного канала между охранным кольцом и фоточувствительной областью из-за наличия пострадиационных заряженных центров как на границе раздела Si-SiO₂ так и в прилегающих к ней областях. Из анализа температурной зависимости темнового тока положение глубоких уровней в

запрещенной зоне после облучения составило $E_v + 0,27$ эВ, что свидетельствует о том, что преобладающими радиационными дефектами являются дивакансии [5]. После воздействия γ -квантов меняется наклон обратной ветви ВАХ вследствие дополнительного вклада процессов генерации ННЗ с глубоких уровней радиационных дефектов. Степенная зависимость $J \sim V^n$ характерна для обратной ветви ВАХ p - n -перехода, в ОПЗ которого преобладает генерация электронно-дырочных пар [3]. Показатель $n > 1$ указывает на высокую концентрацию рекомбинационно-генерационных центров (в нашем случае увеличение концентрации радиационных дефектов). Для исходного образца p - i - n фотодиода в результате аппроксимации обратной ветви ВАХ функцией $I = k \cdot V^n$ в диапазоне $V = 50$ – 100 В значения наклона составили $n_{\text{photo}} \approx n_{\text{guard}} \approx 0,5$, для облученного фотодиода $n_{\text{photo}}^{\text{irrad}} = 2,25$; $n_{\text{guard}}^{\text{irrad}} = 2,32$.

Следует отметить, что наличие ступенек на обратной ВАХ p - i - n фотодиода свидетельствует о том, что зависимость обратного тока нельзя описать одной экспонентой. Для аппроксимации целесообразно применить функцию с двумя слагаемыми вида:

$$I(V) = I_{s1} \exp(qV/n_1 k_B T) + I_{s2} \exp(qV/n_2 k_B T)$$

где первое слагаемое превалирует в области, где существенна рекомбинация, а второе – в области высоких напряжений, где основной вклад вносит генерация.

Установлено, что воздействие γ -излучения на p - i - n фотодиод приводит к росту величины обратного тока и наклона ВАХ. Показано, что темновой ток не облученного фотодиода обусловлен генерацией носителей заряда с глубоких уровней неконтролируемых примесей атомов железа. Как для исходных, так и для облученных образцов наблюдается отклонение формы обратной ветви ВАХ от идеальной, что связано с неравномерным распределением как легирующих, так и технологических примесей.

Литература

1. Pereira do Carmo J. Imaging lidars for space applications / J. Pereira do Carmo [and etc.] // Novel Optical Systems Design and Optimization XI. – 2008. – Vol. 7061. – P. 70610J-01–70610J-12.
2. De Carlo P.M. Intersatellite link for earth observation satellites constellation / P.M. De Carlo [and etc.] // SPACEOPS, Roma, Italy. – 2006. – P. 19–23.
3. Sze S.M. Semiconductor Devices: Physics and Technology / S.M. Sze, Lee M.K. – Pub. 3. – John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited, 2012. – 582 p.
4. Schroder, D.K. Semiconductor material and device characterization / D.K. Schroder. – John Wiley & Sons, 2006. – 781 p.
5. Вопросы радиационной технологии полупроводников / Под ред. Л.С. Смирнова. – Новосибирск: Изд-во «Наука», Сибирское отделение, 1980. – 296 с.

УДК 538.97

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ГИДРОФИЛИЗИРОВАННЫХ
ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТНЫХ ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН**
Мельникова Г.Б.¹, Соломянский А.Е.², Толстая Т.Н.¹, Чижик С.А.^{1,3},
Корольков И.В.^{4,5}, Здоровец М.В.^{4,5}

¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

³Институт химии новых материалов НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

⁴Институт ядерной физики, Нур-Султан
Республика Казахстан

⁵Евразийский национальный университет Л.Н. Гумилева, Нур-Султан
Республика Казахстан

Введение. Трековые мембраны (ТМ) находят широкое применение в процессах разделения и очистки жидких и газообразных сред, а также в аналитических работах, для микрофльтрационных процессов в биотехнологии, медицине, микробиологии и вирусологии. Микрофльтрационные мембраны на их основе должны обладать комплексом свойств: высокая производительность и селективность, гидрофильность или гидрофобность, ионселективность, гемосовместимость, бактерицидность, стерилизующая способность, высокая термо- и химическая стойкость и др. [1].

Разработка методов формирования гидрофильной поверхности мембран является актуальной задачей, несмотря на то, что принципы формирования поверхности мембран для уменьшения их биобрастания и связи с гидратационным слоем были сформулированы более 20 лет назад [2]. К настоящему времени не разработано универсальных методов формирования самоочищающихся поверхностей. Устойчивость к загрязнению маслом является важным критерием мембран, применяемых для разделения эмульсий масло / вода, так как масло может легко накапливаться на верхней поверхности мембран, что приводит к значительному снижению потока. Кроме этого, модифицирование трековых мембран может значительно расширить сферу их возможного применения, благодаря существенному изменению поверхностных характеристик мембран, гидрофильных свойств и возможности изменения размеров пор под действием внешних условий.

Материалы и методы исследования. Трековые полиэтилентерефталатные мембраны (ПЭТФ ТМ) были получены в Астанинском филиале РГП на ПХВ Института ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан. Использовали ПЭТФ пленку торговой марки Hoshpan® RNK-12, которую облучали ионами $^{84}\text{Kr}^{15+}$ с энергией 1,75 МэВ/нуклон на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60. После химического трав-

ления в 2,2 М NaOH при 85 °С получали мембраны с диаметром пор 200 нм. Плотность облучения составляла $1 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ [3].

Для увеличения смачиваемости проводили модифицирование поверхности ТМ формированием однослойных покрытий нафiona методом спин-коатинга и многослойных хитозан / декстран (Хит/ДС) методом послойного осаждения.

Для нанесения пленки нафилна 0,05 %-й раствор нафiona, полученный разбавлением этиловым спиртом коммерческого 5 %-го раствора полимера в высших алифатических спиртах и воде (Sigma-Aldrich), прикапывали на поверхность вращающейся подложки при скорости 2400 об/мин в течение 2 мин.

Многослойные покрытия Хит/ДС формировали послойным осаждением полимеров на поверхности мембран. Покрытия Хитозан использовали как положительно заряженный компонент покрытия, а натриевую соль декстран сульфата (ДС) как отрицательный. Цикл формирования Хит/ДС состоял из ряда последовательных стадий: погружение ПЭТФ ТМ в раствор модификатора; промывка в дистиллированной воде; сушка на воздухе. Цикл формирования бислоя Хит/ДС повторяли 4 раза с целью увеличения равномерности распределения заряда по поверхности ТМ и однородности покрытия.

Исследования структуры поверхности исходных и модифицированных мембран проводили на атомно-силовом микроскопе (АСМ, NT-206, ОДО «Микротестмашины», Беларусь) с использованием стандартных кремниевых кантилеверов FMG 01_SS («TipsNano», Эстония), жесткостью 3 Н/м и радиусом кривизны не более 10 нм.

Гидрофильные свойства поверхности определяли на основании измеренных краевых углов смачивания на установке DSA 100E (KRUSS, Германия). Краевой угол смачивания (КУС) определяли методом лежащей капли. В качестве тестовых жидкостей использовали дистиллированную воду и диидометан (Sigma-Aldrich, чист.

99 %). На основании значений КУ рассчитывали свободную поверхностную энергию по уравнению ОВРК-метода (Оунс, Вендт, Рабель и Кьельбле).

Результаты исследования. Структура поверхности исходных трековых ПЭТФ-мембран с диаметром пор 200 нм и, модифицированных тонкими пленками нафiona, многослойной системой хитозан-декстран изучена методом атомно-силовой микроскопии (рисунок 1).

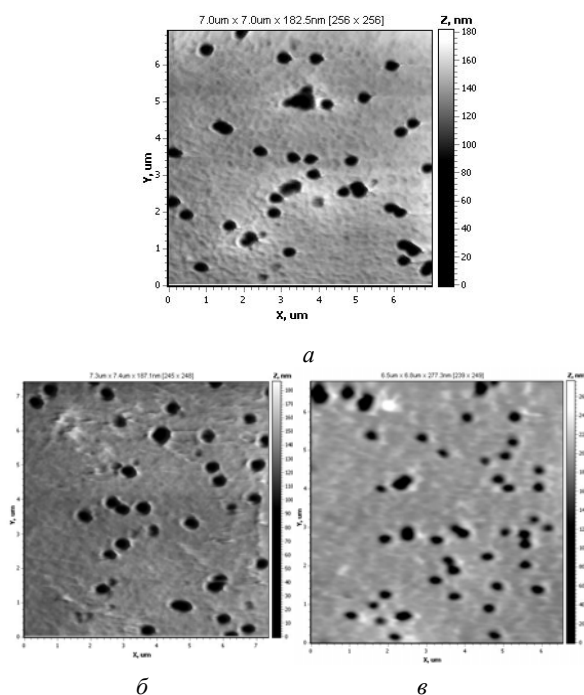


Рисунок 1 – Структура поверхности образцов ПЭТФ-200 (а), б - ПЭТФ-200 / Нафion (б) ПЭТФ-200 / (Хит/ДС)₄ (в)

Диаметр пор мембран после модификации поверхности трековых мембран изменяется незначительно (таблица 1).

Таблица 1 – Значения диаметра пор (D), среднеарифметической (R_a) и среднеквадратической (R_q) шероховатостей, краевого угла смачивания (КУС), удельной поверхностной энергии (w) и ее полярной составляющей (γ^p) исходных и модифицированных ПЭТФ-мембран

Образец	ПЭТФ-200	ПЭТФ-200/нафion	ПЭТФ-200/(Хит/ДС) ₄
Параметр			
D, нм	243,2 ± 40,0	224,9 ± 40,0	264,3 ± 40,0
R_a , нм	7,5	7,2	11,0
R_q , нм	14,2	13,2	19,1
КУС, °	51,0	37,0	36,8
w, мДж/м ²	63,2	63,2	66,5
γ^p , мДж/м ²	15,9	23,2	24,4

Значения R_a и R_q поверхности мембран после модифицирования слоем нафiona толщиной 5 нм изменяется незначительно. Для мембран, модифицированных послойным осаждением системы хитозан – декстран, значения R_a и R_q возрастают на 36 %, что обусловлено наличием конгломератов, размером от 200 до 400 нм на поверхности мембраны. При послойном осаждении однородность покрытия достигается увеличением количества наносимых слоев на поверхность мембраны, однако это может приводить к наличию Хит и/или ДС в глубине пор.

Следует отметить, что диапазон значений диаметра пор, измеренный АСМ незначительно отличается от определенного методом газопроницаемости, что обусловлено методикой определения размеров. В первом случае диаметр определяют на исследуемой внешней поверхности мембраны, во втором методе приводятся усредненные значения по всей площади и объему мембраны на основании проницаемости газов через нее и составляют 200 нм, поэтому и заявляемые значения ниже, чем получаемые АСМ-методом.

Выдерживание модифицированных мембран в дистиллированной воде с последующей сушкой на воздухе не приводило к изменению диаметра пор исследуемых образцов, что свидетельствует о стабильности модифицирующих слоев на поверхности мембран в данных условиях.

Значения удельной поверхностной энергии не изменились, однако возросла полярная составляющая удельной поверхностной энергии исследуемых образцов, что свидетельствует о гидрофиллизации поверхности мембран после их модификации покрытиями (Хит/ДС)₄ или слоем нафiona.

Исследование выполнено в рамках договора с Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований Ф20МС-025 от 04.06.2020 г.

Заключение. На основании полученных результатов показано, что тонкие слои (Хит/ДС)₄ или нафiona, сформированные на поверхности мембран увеличивают гидрофильность их поверхности.

Литература

1. Жданов Г.С. Основные подходы к модифицированию трековых мембран из полиэтилентерефталата / Г.С. Жданов [и др.] // Мембраны. – 2004. – № 2 (22). – С. 3–8.
2. Chapman R.G. Surveying for surfaces that resist the adsorption of proteins / R.G. Chapman [et al.] // J. Am. Chem. Soc. – 2000. – 122. – P. 8303–8304.
3. Корольков И.В. Направленная функционализация и исследование свойств трековых мембран на основе полиэтилентерефталата Дис. PhD. Астана. 2016.

УДК 621

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ В СИСТЕМЕ RO-BaO-TiO₂

Шабур М.А., Колонтаева Т.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск Республика Беларусь

Сегнетоэлектрические керамические материалы, применяемые в электронной технике, должны обладать определенным комплексом физико-химических свойств, к которым относятся плотность, пористость и водопоглощение.

Показатели пористости и водопоглощения свидетельствуют о степени спекания полученных образцов, наличии в их структуре включений газовой фазы, которая снижает электрофизические и механические характеристики изделий.

Наибольшее распространение получили методы насыщения и гидростатического взвешивания, позволяющие одновременно определять кажущуюся плотность и водопоглощение, а также открытую пористость.

В качестве пропитывающей жидкости для обожженных материалов и изделий, не подвергающихся гидратации, используют воду.

Целью данной научной работы является изучение физико-химических свойств керамических материалов с сегнетоэлектрическими свойствами на основе системы «BaO-TiO₂», модифицированной оксидами щелочноземельных металлов RO (R- Mg, Co, Sr). Образцы получали из оксидов и карбонатов по классической технологии.

На рисунке 1 приведена зависимость водопоглощения опытных образцов от вида и содержания разных модифицирующих добавок.

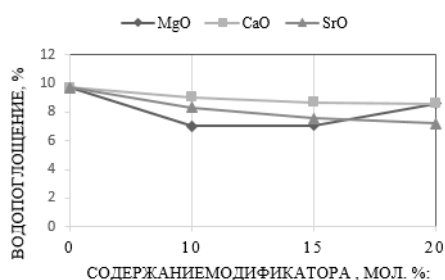


Рисунок 1 – Зависимость водопоглощения опытных образцов от количества и вида модификатора

Из приведенной зависимости видно, что при увеличении количества CaO и SrO водопоглощение снижается практически по линейному закону, а при введении оксида магния зависимость водопоглощения носит сложный характер.

Причиной этого является активация механизмов жидкофазного спекания, характерного для модифицированного титаната бария. Жидкофазным спеканием называется спекание порошкового тела при температуре, обеспечивающей появление жидкой фазы. При жидкофазном спекании

облегчается развитие сил сцепления между отдельными частицами порошка и может сформироваться беспористая структура. При этом большое значение имеют свойства расплава (вязкость, поверхностное натяжение, а также смачивание твердых частиц жидкой фазой). Известно, что чем меньше вязкость расплава, тем выше его реакционная способность, он легче проникает в поровое пространство, в результате чего активизируется взаимодействие между твердой и жидкой фазой. Поверхностное натяжение расплава способствует сближению частиц, при этом возникает капиллярное давление, способствующее заполнению пор. Смачивание расплавом твердых частиц определяется типом химических связей жидкой и твердой фаз, при их однотипности смачивание будет хорошим, что является залогом активного развития процесса спекания. Появление жидкой фазы при нагреве связано с плавлением более легкоплавкого компонента или образованием легкоплавких эвтектик.

При введении оксида магния сначала наблюдается снижение водопоглощения за счет формирования эвтектик в системе MgO-BaO-TiO₂, а затем при накоплении MgO за счет его высокой огнеупорности степень спекания снижается, в результате чего повышается водопоглощение.

На рисунке 2 приведена зависимость пористости от вида и количества модифицирующей добавки.

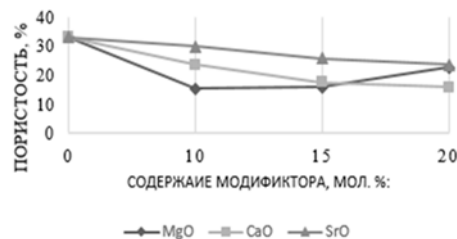


Рисунок 2 – Зависимость пористости опытных образцов от вида и количества модификатора

Значения водопоглощения и пористости взаимосвязаны, так как водопоглощение обусловлено наличием открытых пор в образце, что подтверждается приведенными выше зависимостями.

Кажущаяся плотность (ρ_r) – это отношение массы тела ко всему занятому им объему, включая поры (выражают ее также в кг/м³, г/см³).

На рисунке 3 приведена зависимость кажущейся плотности опытных образцов от вида и количества модифицирующей добавки.

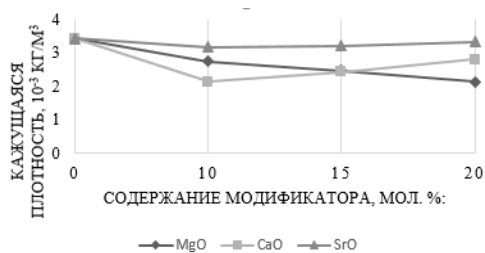


Рисунок 3– Зависимость кажущейся плотности от содержания модификатора

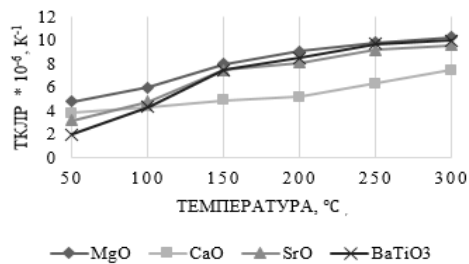


Рисунок 4– Зависимость температурного коэффициента линейного расширения опытных образцов от температуры измерения и вида модификатор

Кажущаяся плотность является функцией двух составляющих – истинной плотности и пористости. Изменение кажущейся плотности можно объяснить уменьшением истинной плотности опытных образцов. Также это связано с тем, что молярная масса оксида бария гораздо выше молярных масс оксидов магния, кальция и стронция ($M(\text{BaO}) = 153,3 \text{ г/моль}$; $M(\text{MgO})=40,3 \text{ г/моль}$; $M(\text{CaO}) = 56 \text{ г/моль}$; $M(\text{SrO})=103,62 \text{ г/моль}$), и они, замещая ион бария полностью не заполняют структуру. Плотность в ряду $\text{BaO}-\text{SrO} - \text{CaO} - \text{MgO}$ уменьшается.

Большинство известных в настоящее время твердых веществ при нагревании расширяются. Несмотря на то, что прочность сил связи в твердом теле очень велика, существуют предпосылки движения элементарных частиц (атомов, ионов). Как в аморфных телах, так и в кристаллических, атомы колеблются около центра равновесия. При этом амплитуда колебаний возрастает с увеличением температуры. Установлено, что и удельный

объем большинства веществ возрастает при увеличении температуры, т. е. имеет место тепловое расширение. Явление термического расширения, однако, связано не только с увеличением амплитуды колебательного движения атомов, как с его ангармоничностью.

Термическое расширение имеет значение для сегнетокерамики, т. к. при производстве изделий из неё проводится нанесение электрода с использованием металлосодержащих паст с определенным ТКЛР.

Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) определяли на кварцевом dilatометре.

Нагрев осуществляли до $300 \text{ }^\circ\text{C}$ со скоростью подъема температуры $5 \text{ }^\circ\text{C}$ в минуту. Температура фиксируется хромель – алумелевой термопарой, ЭДС которой определяется потенциометром типа ПП – 2.

На рисунке 4 представлена зависимость температурного коэффициента линейного расширения опытных образцов от температуры измерения и вида модификатора. Измерения проводились на образцах, содержащих максимальное количество модификатора (20 мол.%).

Из зависимости видно, что коэффициент линейного расширения образцов модифицированных оксидом магния, находится в пределах $(5-10) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.

Наибольшие изменения происходят в интервале температур $0-200 \text{ }^\circ\text{C}$. ТКЛР при использовании оксида кальция изменяется от 3 до $6 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, при этом значения монотонно растут с увеличением температуры. ТКЛР образца, модифицированного оксидом стронция, изменяется в интервале $2,5-8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, наибольшее расширение происходит в температурных пределах от 0 до $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Наибольшее расширение при нагревании претерпевает образец, содержащий оксид магния.

Таким образом, в работе установлено влияние оксидов-модификаторов на свойства титаната бария, что позволило оптимизировать химический состав, обеспечивающий стабильные сегнетоэлектрические свойства.

УДК 621

СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ВИСМУТСОДЕРЖАЩЕЙ СЕГНЕТОКЕРАМИКИ Шабур М.А., Колонтаева Т.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск Республика Беларусь

Данная работа посвящена синтезу керамических материалов на основе системы $\text{RO}-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2$ и исследованию основных структурных свойств опытных образцов. В качестве исходного сырья использовались чистые оксиды и карбонаты. Для управления свойствами материалов

водился модификатор Na_2O в количестве ($N_1 = 2,5 \text{ мол. } \%$, $N_2 = 5 \text{ мол. } \%$, $N_3 = 7,5 \text{ мол. } \%$)

Физико-химические свойства опытных образцов оценивали по значениям водопоглощения, открытой пористости и кажущейся плотности. Данные характеристики являются критери-

альными, благодаря которым можно проследить процесс спекания и установить его технологические параметры.

В таблице 1 приведены физико-химические свойства опытных образцов исходных составов после второго обжига при температуре 1150 °С.

Таблица 1 – Физико-химические свойства опытных образцов исходных составов

Свойства	Номера составов		
	1	2	3
Водопоглощение В, %	0,142	0,096	0,068
Пористость открытая По, %	0,91	0,65	0,43
Плотность кажущаяся, $\rho_{\text{каж}} \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	1,65	1,68	1,82

На рисунках 1, 2 и 3 представлены зависимости соответственно плотности, пористости, водопоглощения от температуры обжига для образцов серии N (введение Na₂O).

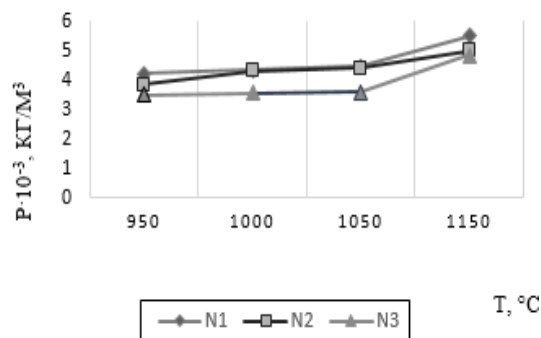


Рисунок 1 – Зависимость кажущейся плотности от температуры обжига

Как видно из приведенных данных, кажущаяся плотность образцов увеличивается при повышении температуры обжига, что объясняется уменьшением пористости, а также увеличением плотности образующихся кристаллических фаз и повышением количества стекловидной фазы, что обуславливает более плотную упаковку зерен образовавшихся структурных составляющих материала.

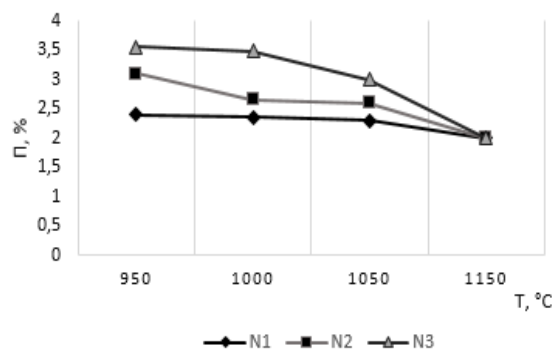


Рисунок 2 – Зависимость открытой пористости образцов от температуры обжига

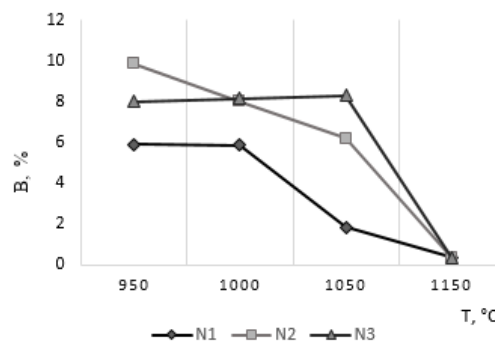


Рисунок 3 – Зависимость водопоглощения образцов от температуры обжига

С увеличением количества Na₂O плотность уменьшается при низких температурах (950–1150 °С) в связи с разрыхлением структуры Na₂O. А при температуре 1150 °С значения кажущейся плотности для различного содержания Na₂O практически не изменяется, в связи с уплотнением структуры.

Открытая пористость и водопоглощение, которые определяются открытыми порами, изменяются на 0,5–1 % в первом случае и на 2–4 % соответственно, но очевидна тенденция к уменьшению величин этих свойств с увеличением температуры обжига, с повышением которой процессы массопереноса активизируются, особенно в случае жидкофазного спекания, так как увеличивается количество расплава, уменьшается его вязкость, повышается проникающая способность. При этом пористость материала заметно уменьшается, вследствие чего снижается водопоглощение образцов и повышается их кажущаяся плотность.

Кроме этого, при увеличении температуры синтеза накопление расплава приводит к уплотнению материала и увеличению усадки образцов в процессе обжига.

Температурный коэффициент линейного расширения опытных образцов размером 4×4×35 мм с подшлифованными до параллельности гранями определяется на горизонтальном кварцевом dilatометре ДКВ-2 в интервале температур 20–400 °С при записи показаний индикатора часового типа через каждые 50 °С согласно методике и ГОСТ 10978-83.

Подготовленный образец вставляется в кварцевую трубку и прижимается кварцевым стержнем и индикатором. После чего кварцевая трубка при помощи каретки задвигается в электрическую печь. Скорость подъема температуры в печи составляет 4–5 °С/мин и регулируется подачей напряжения.

Температура в печи измеряется проградуированной хромель-алюмелевой термопарой, ЭДС которой определяется потенциометром ПП. Средняя ошибка измерения составляет 1–2 %. Расчёт среднего коэффициента линейного рас-

ширения в интервале температур образца α , K^{-1} производится по формуле:

$$\alpha = \frac{nk}{(t_2 - t_1) \cdot L} + \alpha_{кв} \quad (1).$$

где n – показание индикатора, дел; k – цена деления индикатора, мм; $(t_2 - t_1)$ – разность температур (комнатной и конечной) для выбранного интервала при расчёте, $^{\circ}C$; L – длина образца, мм; $\alpha_{кв}$ – поправка на расширение кварцевого стекла, K^{-1} .

Показания прибора фиксировались индикатором часового типа с ценой деления 1 мкм.

Для керамических материалов, на которые наносятся покрытия с последующей термической обработкой, большое значение имеет показатель термического расширения, а именно ТКЛР, так как при несовпадении его значений для материала и покрытия могут наблюдаться нежелательные явления: отскок, коробление, нарушение целостности покрытия.

Графическая зависимость линейного расширения опытных образцов серии N от температуры обжига представлена на рисунке 4.

Данные, приведенные на рисунке 4, свидетельствуют о том, что линейное расширение полученных образцов имеет линейную зависимость от температуры в измеряемом интервале, следовательно термический коэффициент линейного расширения, равный тангенсу угла наклона к оси

температур, постоянный и изменяется в интервале, а для серии N $(9,013-9,739) \cdot 10^{-6} K^{-1}$.

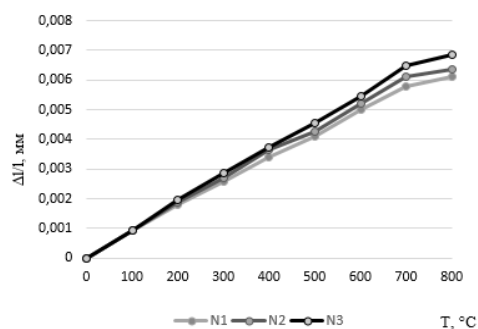


Рисунок 4 – Графическая зависимость линейного расширения опытных образцов серии N от температуры обжига

Такая зависимость указывает на отсутствие полиморфных превращений, связанных с изменением объема и равномерность возникающих напряжений, а значит не приводит к нарушению целостности материала и его деформации, что является благоприятным для технической керамики и позволяет использовать ее в относительно широком интервале температур.

По результатам исследований установлено влияние модификатора на процесс спекания, а также на тепловые свойства синтезированных образцов.

УДК 539.2:669.(6-8)

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ, ТЕКСТУРА И МИКРОТВЕРДОСТЬ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ СПЛАВА $Bi_{20}In_{28}Sn_{52}$ Шепелевич В.Г.¹, Гусакова С.В.¹, Гусакова О.В.²

¹Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

²Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова БГУ
Минск, Республика Беларусь,

Тройные сплавы системы Bi-In-Sn находят применение в качестве припоев в стоматологии. Они также рассматриваются как заменители многочисленных тройных сплавов Bi-Sn-Pb, содержащих свинец, являющийся опасным компонентом для здоровья человека и состояния окружающей среды. В связи с высокой стоимостью индия для получения сплав системы Bi-In-Sn целесообразно использовать ресурсо- и энергосберегающие технологии, к которым относится охлаждение расплавов со сверхвысокими скоростями [1]. Однако структура и свойства сплавов, полученных высокоскоростным охлаждением расплава, значительно отличаются от структуры и свойств сплавов, изготовленных при малых и средних скоростях охлаждения [2, 3]. В связи с этим исследовано влияние сверхвысоких скоростей охлаждения расплава на фазовый состав,

зеренную структуру и механические свойства тройного сплава Bi-In-Sn.

Сплав $Bi_{20}In_{28}Sn_{52}$ изготовлен сплавлением компонентов в кварцевой ампуле (индексы у символов химических элементов указывают их содержание в атомных процентах, массовые концентрации соответствующих компонентов равны 31, 29 и 45 мас. %). Расплав заливался в графитовую изложницу, в которой охлаждался со скоростью 10^2 K/c. Затем кусочек сплава массой $\approx 0,2$ г расплавлялся и капля расплава инжигировалась на внутреннюю полированную поверхность быстровращающегося медного цилиндра. Капля растекалась по поверхности кристаллизатора и затвердевала в виде фольги толщиной 30–120 мкм. Скорость охлаждения расплава составляла порядка 10^5 K/c. Структура фольги исследовалась с помощью растрового электронного мик-

роскопа и LEO 1455VP, оснащенного рентгено-спектральным микроанализатором, дифрактометра Rigaku Ultima IV. Микротвердость измерялась на ПМТ 3.

На дифрактограмме фольги сплава $\text{Bi}_{20}\text{In}_{28}\text{Sn}_{52}$ наблюдаются дифракционные линии (101, 111, 200, 220 и др соединения BiIn (ϵ -фаза) а также дифракционные линии (0001, 1011, 1120 и др.), принадлежащие соединению Sn_4In (γ -фаза). Полученные данные позволяют утверждать, что быстрозатвердевшая фольга соединения $\text{Bi}_{20}\text{In}_{28}\text{Sn}_{52}$ двухфазна.

Изображение микроструктуры фольги, полученное на РЭМ в отраженных электронах, и распределение элементов вдоль линии сканирования представлено на рисунке 1. В микроструктуре фольги наблюдаются светлые и темные участки. Светлые участки, для которых отношение концентрации Bi и In близко к единице соответствует сечениям ϵ -фазы. В темных участках концентрации висмута, индия и олова равны 6, 22 и 72 ат. %, соответственно. Это позволяет считать, что темные участки являются сечениями выделений γ -фазы, в которой часть атомов олова замещена атомами висмута.

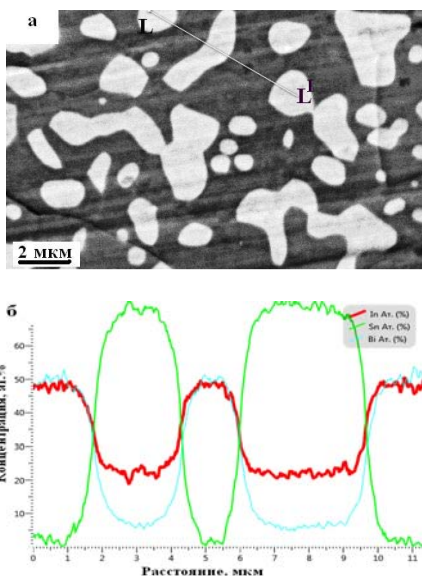


Рисунок 1 – Микроструктура (а) и распределение элементов вдоль линии сканирования L-L¹ (б) быстрозатвердевшей фольги сплава $\text{Bi}_{20}\text{In}_{28}\text{Sn}_{52}$

Металлографический анализ слоя фольги, прилегающего к кристаллизатору показал, что объемная доля ϵ -фазы равна 0,38, а γ -фазы – 0,62.

Распределение хорд случайных секущих ϵ -фазы и γ -фазы приведено на рисунке 2. Наибольшая доля хорд сечений приходится на размерную группу от 1 до 2 мкм. Наибольшие хорды сечений ϵ -фазы и γ -фазы не превышают 6 и 9 мкм, соответственно. Средние сечения длин хорд для сечений ϵ - и γ -фаз составляют 1,7 мкм и

2,6 мкм, соответственно. Удельная поверхность межфазных границ, рассчитанная из стереографического соотношения [3] равна 0,86 мкм⁻¹.

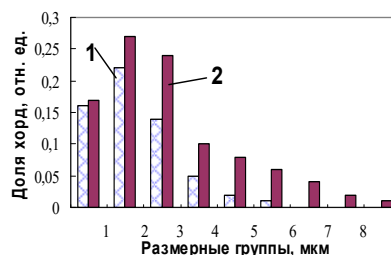


Рисунок 2 – Распределение хорд случайных секущих ϵ -фазы (1) и γ -фазы (2)

Текстура фольги исследована методом обратных полюсных фигур. Значения полюсных плотностей дифракционных линий, рассчитанная по методу Харриса [4] для ϵ -фазы и γ -фазы, снятых на стороне фольги, прилегающей к кристаллизатору, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Полюсные плотности дифракционных линий ϵ - и γ -фаз фольги сплава $\text{Bi}_{20}\text{In}_{28}\text{Sn}_{52}$

BiIn (ϵ -фаза)		Sn ₄ In (γ -фаза)	
Дифракционная линия	Полюсная плотность	Дифракционная линия	Полюсная плотность
101	1,5	0001	4,5
111	0,9	1010	1,5
200	0,5	1011	0,5
220	1,4	1120	0,4
102	0,9	1121	0,4
201	1,3	1012	0,3
212	1,3	2021	0,3
113	0,2	1122	0,2

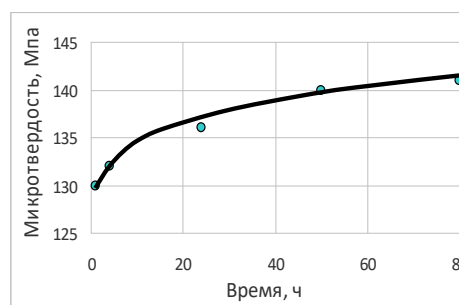


Рисунок 3 – Микротвердость быстрозатвердевшей фольги сплава $\text{Bi}_{20}\text{In}_{28}\text{Sn}_{52}$

Наибольшее значение полюсной плотности γ -фазы принадлежит дифракционной линии 0001, т.е. наблюдается текстура (0001), при которой более 50 % площади зерен данной фазы ориентированно плоскостью (0001) параллельно поверхности фольги. Образование такой текстуры обусловлено тем, что плоскость (0001) является наиболее плотноупакованной [5]. В ϵ -фазе не наблюдается преимущественной ориентировки зерен.

Микротвердость быстрозатвердевшей фольги исследуемого сплава с ростом времени выдержки при комнатной температуре монотонно увеличивается. Причина увеличения микротвердости быстрозатвердевшей фольги сплава $\text{Bi}_{20}\text{In}_{28}\text{Sn}_{52}$ заключается в улучшении структуры границ зерен и фаз благодаря диффузионным процессам, активно протекающим при комнатной температуре.

Таким образом, фольга сплава $\text{Bi}_{20}\text{In}_{28}\text{Sn}_{52}$, полученная сверхбыстрым охлаждением из расплава, состоит из ε - и γ -фаз. Дисперсные частицы ε -фазы вкраплены в γ -фазе. Средние длины хорд случайных секущих на сечениях выделений ε - и γ -фаз равны 1,7 и 2,6 мкм, соответственно, а удельные поверхности межфазной границы – $0,86 \text{ мкм}^{-1}$. Фаза In_4Sn (γ -фаза) затвердеванием с образованием текстуры (0001). Стабилизация

границ зерен и фаз приводит к росту микротвердости фольги при комнатной температуре.

Литература

1. Шепелевич В.Г. Быстрозатвердевшие легкоплавкие сплавы / В.Г. Шепелевич. – Минск: БГУ, 2015. – 192 с.
2. Shepelevich V.G. The microstructure and microhardness of rapidly solidified foils of eutectic alloy In – 47 at. % Sn / V.G. Shepelevich, L.P. Scherbachenko // British Journal of Science. Education and Culture. – 2015. – Vol. 111 – № 1(7) – Pp. 863–869.
3. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1976. – 270 с.
4. Русаков А.А. Рентгенография металлов / А.А. Русаков. – М.: Металлургия, 1977. – 329 с.
5. Вассерман Г. Текстуры металлических материалов / Г. Вассерманн, И. Гревен. М.: Металлургия, 1969. – 655 с.

УДК 535.37

ВХОЖДЕНИЕ ИОНОВ ТУЛИЯ В КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ И СТЕКЛЯННУЮ ФАЗЫ В ОКСИФТОРИДНОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКЕ

Ясюкевич А.С.¹, Кулешов Н.В.¹, Рачковская Г.Е.², Захаревич Г.Б.², Трусова Е.Е.²

¹НИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ

Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный технологический институт

Минск, Республика Беларусь

Оксифторидные стекла, активированные ионами редкоземельных элементов (РЗЭ) представляют значительный интерес как прекурсоры для получения нанокерамических материалов, которые сочетают в себе низкую энергию фононов фторидов (CaF_2 , SrF_2 , PbF_2 , и др.) с химической и механической стабильностью оксидных матриц. В таких материалах редкоземельные ионы частично входят как в стеклянную, так и в керамическую фазы и есть возможность в некоторой степени формировать спектроскопические характеристики наностеклокерамики.

Для получения лазерной генерации в области спектра ≈ 1800 – 1900 нм привлекательными являются материалы, активированные ионами тулия. В данной работе мы изучали оксифторидные стекла состава $30 \text{ SiO}_2 + 10 \text{ GeO}_2 + 20 \text{ PbO} + 30 \text{ PbF}_2 + 10 \text{ CdF}_2 + x \text{ Tm}_2\text{O}_3$ ($x = 0,1; 0,5; 1,0; 2,0$) и стеклокерамики, полученные на основе этих стекол при вторичной термообработке при температуре 400 °С. Гидростатическим методом были определены плотности стекол и по их молярному составу были рассчитаны концентрации ионов тулия в исходных стеклах. В работе [1], где исследовались стекломатериалы близкого состава, было показано, что в результате вторичной термообработки при температуре 400 – 420 °С из исходного стекла образуется стеклокерамика с кристаллической фазой β - PbF_2 .

При изучении оксифторидных стекол основное внимание нами уделялось разработке спек-

троскопического метода определения относительного содержания ионов тулия в стеклянной и кристаллической фазах в оксифторидной стеклокерамике. Наш метод исследования основан на сравнении спектров поглощения стекол и стеклокерамик, полученных в результате термообработки. Спектры поглощения образцов в виде пластинок толщиной ≈ 1 мм регистрировались на спектрофотометре Cary 5 000 при комнатной температуре. Распределение кристаллической фазы в наших материалах после термообработки было неоднородным, что приводило к появлению непрозрачных областей в объеме образцов. В работе [2] были представлены спектры сечений поглощения $\text{Tm}:\text{PbF}_2$. Спектры сечений поглощения исходных стекол и коэффициенты поглощения полученных стеклокерамик были определены нами. Спектр коэффициента поглощения стеклокерамики $k_{abs}(\lambda)$ может быть представлен в виде

$$k_{abs}(\lambda) = \sigma_{abs}^{gl}(\lambda) N_{Tm} x_1 + \sigma_{abs}^{cr}(\lambda) N_{Tm} x_2, \quad (1)$$

где $\sigma_{abs}^{gl}(\lambda)$, $\sigma_{abs}^{cr}(\lambda)$ – сечения поглощения ионов тулия в стеклянной и кристаллической фазах, соответственно, N_{Tm} концентрация тулия в исходном образце стекла, x_1 и x_2 – параметры, которые характеризуют относительное содержание ионов тулия в стеклянной и кристаллической фазах в прозрачной области

образца. Тогда часть ионов туллия x_3 , которая находится в непрозрачной части образца может быть определена как $x_3 = 1 - x_1 - x_2$. Относительное содержание ионов туллия ϵ в кристаллической фазе в прозрачной области стекломатериала $\epsilon = x_2 / (x_1 + x_2)$. Для исследования спектров поглощения оказалась удобной линия в области 1650 нм соответствующая переходу ${}^3H_6 \rightarrow {}^3F_4$.

Параметры x_1 и x_2 определялись в процессе подгонки расчетного спектра по (1) к экспериментально определенному спектру коэффициента поглощения стекла после вторичной термообработки. Режим вторичной термообработки будет указан в следующем виде: X/Y, где X – температура в градусах Цельсия, Y – длительность термообработки в часах. Для образцов стекла с содержанием $Tm_2O_3 - 0,5$ мол %, как и для стекла с $Tm_2O_3 - 0,1$ мол % не наблюдалось изменений в спектрах поглощения при вторичной термообработке при следующих режимах: 400/3; 400/6 и 400/9. На рисунках 1 и 2 представлены примеры результатов подгонки спектров поглощения по формуле (1) для образцов стекла содержанием $Tm_2O_3 - 2$ мол % и 1 мол %, соответственно.

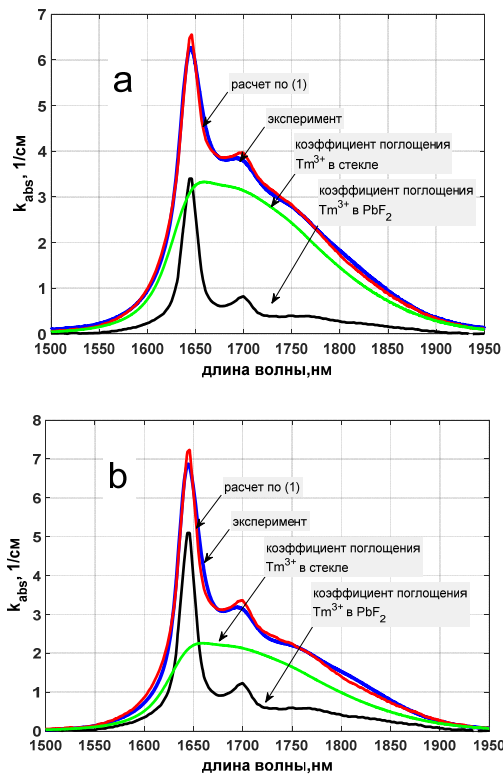


Рисунок 1 – Спектры поглощения образцов стеклокерамики с исходным содержанием $Tm_2O_3 - 2$ мол %. Вторичная термообработка: a – 400/3, b – 400/6

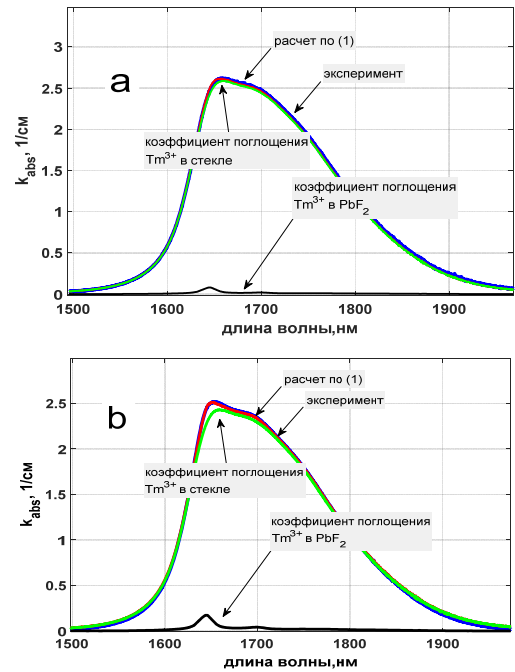


Рисунок 2 – Спектры поглощения образцов стеклокерамики с исходным содержанием $Tm_2O_3 - 1$ мол %. Вторичная термообработка: a – 400/3; b – 400/6

На рисунке 3 представлены результаты определения зависимости параметров x_1 , x_2 , x_3 и ϵ от времени вторичной термообработки при 400 °С.

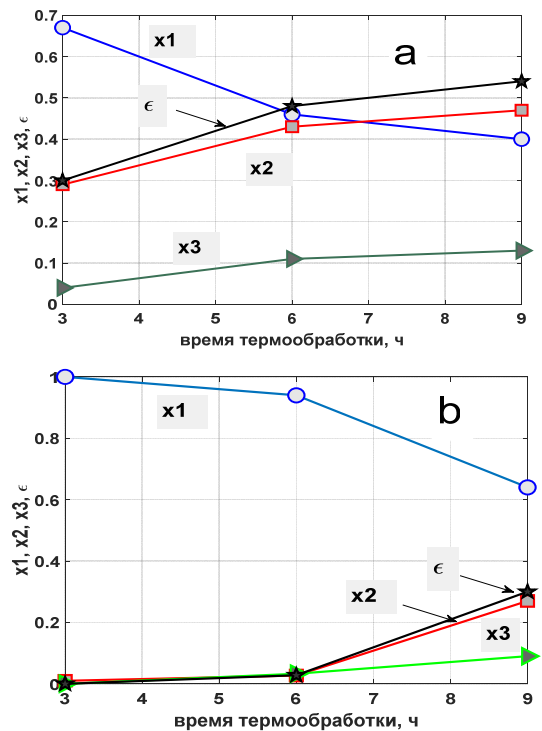


Рисунок 3 – Зависимости параметров x_1 , x_2 , x_3 и ϵ от длительности вторичной термообработки: a – $Tm_2O_3 - 2$ мол %, b – $Tm_2O_3 - 1$ мол %

Как видно из представленных результатов, при увеличении времени термической обработки стекла, возрастает часть ионов тулия в кристаллической фазе, при этом возрастает и часть ионов тулия, которая сосредоточена в рассеивающих (непрозрачных) областях стекломатериала. Таким образом, нами предложен спектроскопический метод определения относительного содержания ионов тулия в стеклянной и кристаллической фазах в оксифторидных стеклокерамиках.

УДК 535.3

РАСЧЕТ ФАКТОРОВ ЭФФЕКТИВНОСТЕЙ ОСЛАБЛЕНИЯ, РАССЕЯНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ СИСТЕМОЙ ВОДЯНЫХ КАПЕЛЬ

Бобученко Д.С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Известно, что облака и туманы в нижних слоях состоят из мельчайших капель жидкой воды, а в верхних слоях из кристаллов водяного льда. Для дистанционного зондирования атмосферы и исследования климата и других приложений требуются точные знания ослабления, рассеяния и поглощения совокупностью сферических капель.

Факторы эффективности ослабления Q_{ext} , рассеяния Q_{sca} , поглощения Q_{abs} , и обратного рассеяния Q_b излучения системой частиц, с учетом их распределения по размерам, рассчитывались по формулам:

$$Q_{ext} = \int_0^{\infty} \frac{C_{ext}(r)}{\pi r^2} f(r) dr, \quad (1)$$

$$Q_{sca} = \int_0^{\infty} \frac{C_{sca}(r)}{\pi r^2} f(r) dr, \quad (2)$$

$$Q_{abs} = \int_0^{\infty} \frac{C_{abs}(r)}{\pi r^2} f(r) dr, \quad (3)$$

$$Q_b = \int_0^{\infty} \frac{C_b(r)}{\pi r^2} f(r) dr. \quad (4)$$

В этих формулах r – радиус сферической капли, $f(r)$ – функция распределения капель по размерам, C_{ext} , C_{sca} , C_{abs} , C_b – сечения ослабления, рассеяния, поглощения и обратного рассеяния одной капли.

Предполагалось, что спектр капель по размерам описывается нормальным распределением (распределения Гаусса):

$$f(r) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(r-r_0)^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (5)$$

где r_0 – математическое ожидание (среднее значение), σ – среднеквадратичное отклонение (σ^2 – дисперсия).

Литература

1. Вилейшикова Е.В. Ур-конверсионная люминесценция оксифторидной стеклокерамики с нанокристаллами $PbF_2:(Yb^{3+}, Eu^{3+}, RE^{3+})$ ($RE = Tm, Ho$ или Er) / Е.В. Вилейшикова, П.А. Лойко, Г.Е. Рачковская и др. // Журнал прикладной спектроскопии. – 2016. – Т 83, № 5. – С. 677–685.

2. Yin J.G. Transition Intensities and Excited State Relaxation Dynamics of Tm^{3+} in $Tm:PbF_2$ Crystal / J.G. Yin, Y. Hang, X.H. He, et al // Laser Physics. – 2012. – Vol. 22, No. 3. – Pp. 609–613.

Сечения ослабления C_{ext} , рассеяния C_{sca} , поглощения C_{abs} , обратного рассеяния C_b излучения одной капли определялись по суммированием по рядам [1]:

$$C_{ext} = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) Re(a_n + b_n), \quad (6)$$

$$C_{sca} = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2), \quad (7)$$

$$C_{abs} = C_{ext} - C_{sca}, \quad (8)$$

$$C_b = \frac{\pi}{k^2} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(-1)^n (a_n - b_n) \right|^2, \quad (9)$$

где $k=2\pi/\lambda$, λ – длина волны излучения. В свою очередь коэффициенты a_n , b_n в рядах определялись по формулам:

$$a_n = \frac{\left[\frac{D_n(mx)}{m} + \frac{n}{x} \right] \Psi_n(x) - \Psi_{n-1}(x)}{\left[\frac{D_n(mx)}{m} + \frac{n}{x} \right] \xi_n(x) - \xi_{n-1}(x)}, \quad (10)$$

$$b_n = \frac{\left[mD_n(mx) + \frac{n}{x} \right] \Psi_n(x) - \Psi_{n-1}(x)}{\left[mD_n(mx) + \frac{n}{x} \right] \xi_n(x) - \xi_{n-1}(x)}. \quad (11)$$

В этих выражениях m – относительный комплексный показатель преломления ($m=m_r+im_{im}$), $x = k r$ – безразмерная величина называемая параметром дифракции, функции $\Psi_n(x)$, $\xi_n(x)$ – Риккати-Бесселя, $D_n(y) = \frac{d}{dy} \ln \Psi_n$. Для получения точных результатов, расчет D_n проводился по обратной рекурсии с удвоенной точностью:

$$D_{n-1}(y) = \frac{n}{y} - \frac{1}{D_n(y) + \frac{n}{y}}, \quad (12)$$

$$D_{max} = 0.0 + i0.0. \quad (13)$$

Расчет $\Psi_n(x), \xi_n(x)$ осуществлялся по прямой рекурсии:

$$\Psi_{n+1}(x) = \frac{2n+1}{x} \Psi_n(x) - \Psi_{n-1}(x), \quad (14)$$

$$\Psi_{-1}(x) = \cos x, \quad \Psi_0(x) = \sin x, \quad (15)$$

$$\xi_{-1}(x) = \cos x + i \sin x; \quad (16)$$

$$\xi_0(x) = \sin x - i \cos x. \quad (17)$$

Для выполнения расчетов создана компьютерная программа на языке Python с применением пакетов numpy, scipy, matplotlib, предназначенных для решения научных и математических проблем.

Водяные капли образуются при подъеме теплых слоев воздуха, которые, адиабатически расширяясь, охлаждаются, и находящийся в воздухе водяной пар, достигнув некоторого пересыщения, конденсируется на многочисленных ядрах конденсации. Спектр размеров капель облака зависит от различных условий этих процессов, и различен не только для разных типов облаков, но для облаков одного и того же типа [2]. Большая часть капель имеет радиус 2 до 70 мкм. Вода в каплях не является абсолютно чистой, и может поглощать излучение, поэтому комплексный показатель преломления воды, применяемый в расчетах, принимался равным $m = 1,333 + i \cdot 0,1$.

Расчеты проводились для длины волны 1,064 мкм, так как при зондировании атмосферы часто используются Nd YAG лазеры с такой длиной волны.

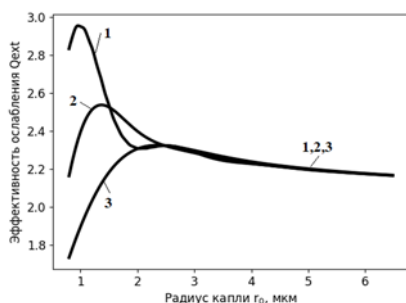


Рисунок 1 – Зависимость фактора эффективности ослабления от радиуса капли, для одной (1); при $\sigma=1,0$ (2); 2,5 (3)

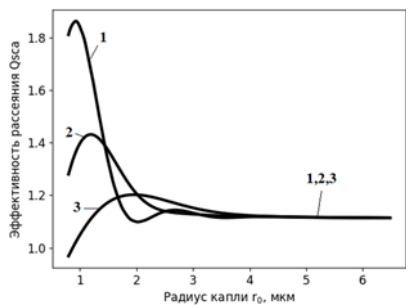


Рисунок 2 – Зависимость фактора эффективности рассеяния от радиуса капли, для одной (1); при $\sigma=1,0$ (2); 2,5 (3)

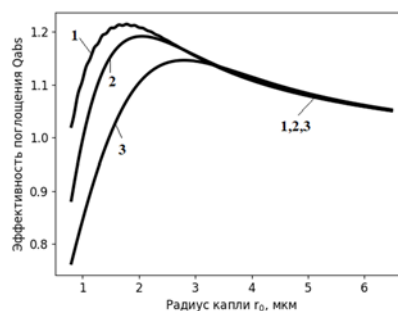


Рисунок 3 – Зависимость фактора эффективности поглощения от радиуса капли, для одной (1); при $\sigma=1,0$ (2); 2,5 (3)

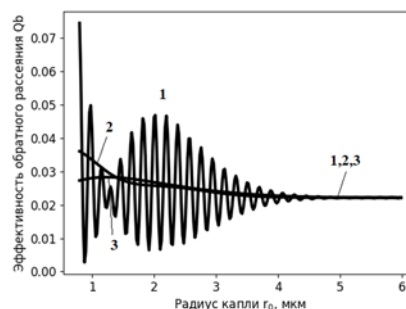


Рисунок 4 – Зависимость фактора эффективности обратного рассеяния от радиуса капли, для одной (1); при $\sigma = 1,0$ (2); 2,5 (3)

Результаты расчетов представлены на рисунках. При r_0 больше 6 мкм приведенные характеристики рассеяния для одной капли и для спектра капель практически совпадают. Для одиночной сферической капли при параметрах дифракции меньше 20 характерно наличие регулярно расположенных резких максимумов и минимумов, называемых «интерференционной структурой». Учет спектра капель по размерам сглаживает эти пики. Кроме того, учет распределения капель по размерам и величина среднеквадратичного отклонения σ («ширина» спектра распределения) также существенно изменяют величины характеристик рассеяния по сравнению с тем, если бы частицы имели одинаковый размер. Эффективности ослабления и рассеяния для капель $r_0 < 3$ мкм становятся тем меньше, чем больше σ , поскольку увеличивается доля малых капель, которые имеют меньшие значения эффективностей. По этой же причине уменьшается эффективность поглощения. Эффективность обратного рассеяния становится значительно более гладкой, отсутствуют характерные для одиночных капель осцилляции.

В целом, результаты работы показали существенную роль учета распределения капель по размерам при анализе характеристик рассеяния излучения.

Литература

1. Борен К., Хафман Д.Р. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986.
2. Л.Дж.Баттан. Человек будет изменять погоду. Л.: Гидромет, 1965.

УДК 666.766:[666.321+614.842.615]

ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ БЕЗОБЖИГОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО И УТИЛИЗИРУЕМОГО ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЯ

Дятлова Е.М.¹, Попов Р.Ю.¹, Богдан Е.О.¹, Колонтаева Т.В.²

¹Белорусский государственный технологический университет
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Современные теплоизоляционные материалы широко используются для тепловой изоляции ограждающих конструкций зданий, технологического оборудования и различных теплотехнических установок. Их применение обеспечивает достижение высоких технико-экономических показателей и способствует существенному снижению расхода основных строительных материалов и, что наиболее важно, топливно-энергетических ресурсов.

Среди различных теплоизоляционных материалов, получаемых по безобжиговой технологии, особое место занимают поризованные гипсовые материалы. Попытки поризации гипсовых материалов издавна привлекали ученых и производителей строительных материалов из-за доступности вяжущего, его технологичности, экологической чистоты, низких энергозатрат при производстве и целого ряда других положительных качеств [1].

В настоящее время поризованные гипсовые блоки и плиты, изготавливаемые в соответствии с ТУ-5742-021-01667404-01, предназначены для возведения самонесущих внутренних стен и перегородок с сухим и нормальным режимом помещений, а также при устройстве наружных стен в качестве теплозащитного слоя, защищенного от прямого попадания влаги. Стена, выполненная из пеногипсовых блоков, защищенных кирпичной кладкой в 0,5 кирпича, имеет термическое сопротивление 2,18 Вт/(м·°С) и 3,3 Вт/(м·°С) при толщине пеногипса, соответственно, 20 и 40 см.

Возможность производства поризованных гипсовых материалов появилась после разработки в МГСУ (МИСИ) технологии сухой минерализации пены [2]. Суть технологии предельно проста: из раствора поверхностно-активных веществ (ПАВ) непрерывным способом изготавливается пена необходимой кратности, которая минерализуется путем посыпки порошком гипсового вяжущего при одновременном перемешивании.

Гипсовое вяжущее, попадая в жидкую фазу, переводит пену из жидкой в вязкотекучую пену-массу. Длительность процесса составляет не более 1 минуты. Готовая пеномасса непрерывно подается на заливку в формы или на конвейер, где и происходит ее схватывание. Данная технология является единственной, обеспечивающей получение пеногипсовых изделий широкой номенклатуры и различной плотности.

Уникальность технологии заключается в том, что структура материала закладывается на стадии получения пены, показатели которой легко регулируются за счет изменения концентрации ПАВ, кратности пены, вида пеногенератора и условий минерализации. Так изменение соотношения скоростей пенообразования и минерализации позволяет получить структуру пеногипса с замкнутыми порами, что желательно для теплоизоляционных материалов, или с сообщающимися порами, что необходимо для звукопоглощающих материалов.

Для получения пеногипсовых материалов используют, как правило синтетические поверхностно-активные вещества различной природы. Однако представляет интерес исследование возможности получения поризованных гипсовых материалов с использованием пенообразователя для пожаротушения «Барьер-пенообразующий» с истекшим сроком годности.

Указанный пенообразователь представляет собой водный раствор поверхностно-активных веществ и используется для получения воздушно-механической пены при тушении пожаров отдельных видов горючих жидкостей. Согласно данным Научно-исследовательского института пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций, ежегодно в Республике Беларусь образуется порядка 70–100 т пенообразователей, у которых показатели качества не соответствуют требованиям ТНПА в области обеспечения пожарной безопасности.

Однако невостребованные в течение установленного срока годности указанные пенообразователи для тушения пожаров, сохраняют вполне приемлемые пенообразующие свойства и могут применяться для получения теплоизоляционных материалов. Приведенные ранее исследования пен, полученных с использованием утилизируемого пенообразователя «Барьер-пленкообразующий», свидетельствуют о возможности их применения в данной технологии [3,4].

Следует отметить, что ранее проведенные исследования показали целесообразность использования пенообразователя «Барьер-пленкообразующий» с истекшим сроком годности для получения ячеистых теплоизоляционных материалов на основе полиминерального сырья Республики Беларусь [4].

Образцы пеногипсовых материалов получали по технологии сухой минерализации пены. Для этого готовили пену необходимой кратности, путем тщательного смешения пенообразователя с водой с помощью лабораторной мешалки. Соотношение «вода:пенообразователь» варьировали в пределах (4–5):(1–2). Затем добавляли гипсовое вяжущее марки Г5 при непрерывном тщательном перемешивании. Гипсовое вяжущее, попадая в жидкую фазу, переводит пену из жидкой в вязкотекучую пеномассу. Длительность этого процесса составляет 1–2 минуты. Готовая пеномасса заливалась в специальные формы, где и происходило ее схватывание.

Следует отметить, что в этом случае структура материала закладывалась на стадии получения пены и пеномассы, показатели которой можно регулировать за счет изменения концентрации пенообразователя, кратности пены и других технологических параметров.

Затем образцы подвергали сушке на воздухе, а после – в сушильном шкафу при температуре $80 \pm 10^\circ\text{C}$.

Полученные образцы пеногипсовых материалов характеризовались следующими физико-техническими характеристиками: открытая пористость 67,1–82,2 %; кажущаяся плотность 358–513 кг/м³; механическая прочность при сжатии 1,5–2,8 МПа.

Установлено, что при увеличении процентного содержания пенообразователя по отношению к воде, водопоглощение и открытая пористость закономерно растут. Это связано с тем, что при повышении содержания пенообразователя увеличивается способность массы вспениваться, образуется более равномерная и высокодисперсная пена, что в конечном итоге дает весьма равномерную пористую структуру, состоящую из пор примерно одинакового размера. Однако это негативно сказывается на прочностных характеристиках такого материала.

На основании проведенных исследований установлено, что оптимальны является состав в котором соотношение «пенообразователь : вода» составляет 2 : 5, поскольку образцы, полученные на его основе, имеют оптимальные показатели открытой пористости (80,3 %) и механической прочности при сжатии (1,7 МПа).

Ввиду того, что полученные материалы характеризуются несокими значениями механической прочности, представляется целесообразным исследовать влияние различных добавок, спо-

собствующих повышению прочностных характеристик образцов.

Как видно из рисунка 1, полученные материалы характеризовались равномерной ячеистой структурой с преимущественно изометрическими пора-ми округлой формы. Причем присутствовали как закрытые, так и открытые сообщающиеся поры.

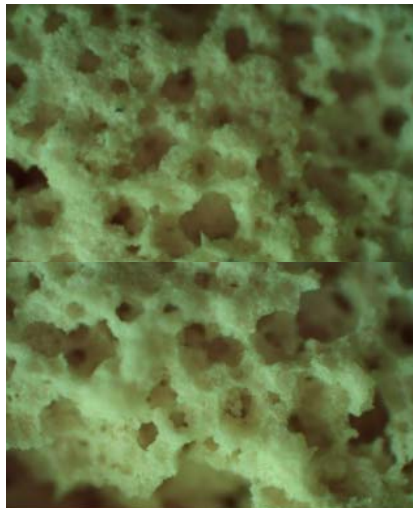


Рисунок 1 – Снимки с поверхности образцов, выполненные с помощью оптического микроскопа ($\times 40$)

Таким образом, в работе показана возможность получения поризованных гипсовых материалов по технологии сухой минерализации пены с использованием пенообразователя «Барьер-пенообразующий» с истекшим сроком годности, подлежащего утилизации.

Литература

1. Производство ячеистобетонных изделий: теория и практика / Н.П.Сажнев [и др.]. – Минск: Стринко, 2010. – 464 с.
2. Румянцев, Б.М. Производство и применение пеногипсовых материалов / Б.М. Румянцев, Д.С. Критарасов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века, 2004. – N 9. – С. 74–76.
3. Теплоизоляционные керамические материалы на основе белорусского каолинового сырья и утилизируемого пенообразователя / Е.М. Дятлова [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – Минск: БГТУ, 2017. – № 1. – С. 75–80.
4. Дятлова, Е.М. Теплоизоляционные керамические материалы на основе огнеупорного и тугоплавкого глинистого сырья Республики Беларусь / Дятлова, Е.М., Попов Р.Ю., Богдан Е.О. // Огнеупоры и техническая керамика, 2018 – № 6. – С. 3–8.

УДК 620.179.14

ІМПУЛЬСНЫ МАГНІТНЫ КАНТРОЛЬ ЯКАСЦІ ВОДПУСКУ ВЫРАБАЎ З ХУТКАРЭЗНАЙ СТАЛІ Р9 ПА СТАНДАРТНЫХ МАГНІТНЫХ ПАРАМЕТРАХ

Бурак В.А., Караткевіч З.М.

Інстытут прыкладной фізікі НАН Беларусі
Мінск, Рэспубліка Беларусь

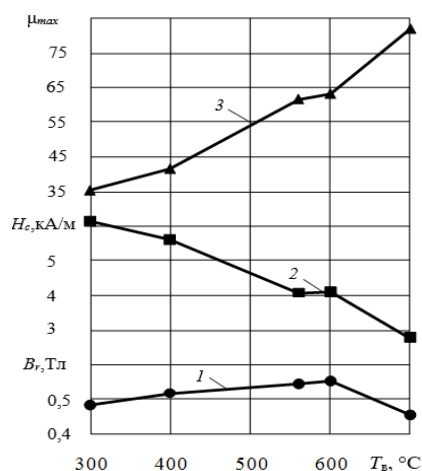
Неразбуральны кантроль структурнага стану рэжучага інструменту з розных марак сталяў з'яўляецца актуальнай задачай павышэння якасці і эканамічнасці розных тэхналагічных працэсаў. Добрыя эксплуатацыйныя ўласцівасці і іх стабільнасць на працягу доўгага часу вызначаюцца хімічным складам і тэрмічнай апрацоўкай, якой падвяргаюцца вырабы. Хуткарэзныя сталі, да якіх адносіцца сталь Р9, знайшлі шырокае прымяненне пры вытворчасці разнастайнага інструменту. Гэтыя сталі маюць высокую цвёрдасць і добрую зносаўстойлівасць, якая забяспечваецца дастатковай для насычэння легіруючымі элементамі тэмпературай нагрэву пад загартоўку і трохразовым водпускам пры тэмпературах ад 550 да 570 °С [1].

У якасці аб'ектаў даследавання былі ўзятыя свердзелы, вырабленыя на ААА «Аршанскі інструментальны завод» з хуткарэзнай сталі Р9. Свердзелы былі загартаваныя ад рэкамендаванай у нарматыўна-тэхнічнай дакументацыі тэмпературы 1225 °С з вытрымкай цягам дзвюх хвілін, а пасля падвергнутыя водпуску пры тэмпературах 300, 400, 560, 600 і 700 °С цягам адной гадзіны.

Раней аўтарамі былі праведзеныя даследаванні [2], падчас якіх было вызначана, што па велічыні градыента нармальнай састаўляючай напружанасці поля астаткавай намагнічанасці ажыццяўляць імпульсны магнітны кантроль якасці праведзенага водпуску не падаецца магчымым. Перспектывным напрамкам далейшага развіцця магнітнага метаду кантролю якасці тэрмаапрацоўкі і структурнага стану інструментальных хуткарэзных сталяў з'яўляецца вывучэнне ўплыву тэмператур нагрэву пад загартоўку і пры водпуску на параметры пяці магнітнага гістэрэзісу, атрыманай падчас імпульснага намагнічвання і вымярэнняў ферамагнітных узораў і вырабаў у разамкнёным магнітным ланцугу ў прахадным датчыку. Выкарыстанне прахаднага датчыка для вырабаў са складанай формай паверхні і вялікім значэннем адносін даўжыні да дыяметра дазваляе выключыць уплыў краявога эфекту і атрымаць інтэгральную ацэнку структурнага стану ўсяго вырабу, а не асобнай ягонай часткі, як у выпадку намагнічвання і вымярэння накладным датчыкам імпульсных магнітных аналізатараў.

Намагнічванне і перамагнічванне ў прахадным датчыку свердзел са сталі Р9 ажыццяўлялася прыборам для вымярэння магнітнай індукцыі ІМІ-І [3] імпульсным магнітным полем працягласцю 400 мс і амплітудай каля 60 кА/м,

што дазволіла атрымаць для даследуемых вырабаў стан, блізкі да тэхнічнага насычэння. Для далейшага разгляду па атрыманых для кожнага са свердзел петлях магнітнага гістэрэзісу былі ўзяты наступныя стандартныя магнітныя характарыстыкі: каарцытыўная сіла H_c , астаткавая магнітная індукцыя B_r і максімальная магнітная пранікальнасць μ_{max} , залежнасці якіх ад тэмпературы можна пабачыць на малюнку 1.



Малюнак 1 – Залежнасці астаткавай магнітнай індукцыі B_r (1), каарцытыўнай сілы H_c (2) і максімальнай магнітнай пранікальнасці μ_{max} (3) свердзелаў са сталі Р9 ад тэмпературы водпуску

Выбар такіх інфарматыўных параметраў абумоўлены тым, што інфармацыю пра залежнасці прыведзеных вышэй магнітных велічынь ад тэмпературы тэрмаапрацоўкі можна параўнаць з прадстаўленымі ў [4], атрыманымі для ўзораў простаі формы ў замкнёным магнітным ланцугу. Супастаўленне эксперыментальных і запазычаных з літаратуры дадзеных дазваляе гаварыць пра тое, што заканамернасці змянення велічыняў каарцытыўнай сілы H_c , астаткавай магнітнай індукцыі B_r і максімальнай магнітнай пранікальнасці μ_{max} , вызначаных пры розных значэннях тэмпературы водпуску, для вымераных у замкнёным магнітным ланцугу цыліндрычных узораў са сталі Р9 падобныя да вымераных у разамкнёным магнітным ланцугу свердзел з той жа маркі сталі негледзячы на складаную фасоную паверхню вырабаў.

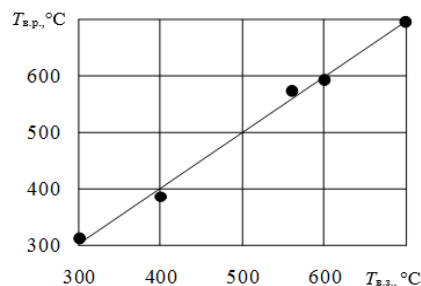
Як бачна з прадстаўленых на малюнку 1 залежнасцей, для вырашэння задачы неразбуральнага магнітнага кантролю якасці праведзенага водпуску свердзел са сталі Р9 можна

выкарыстоўваць максімальную магнітную пранікальнасць μ_{max} (крывая 3, малюнак 1), якая адназначна ўзрастае з павышэннем тэмпературы нагрэву пры водпуску і мае дастаткова добрую адчувальнасць, не ніжэй за 14% на 100 °С ва ўсім дыяпазоне змянення тэмператур, у тым ліку каля 5% на 100 °С на ўчастку тэмператур водпуску, рэкамендаваных стандартам. Для каарцытыўнай сілы H_c (крывая 2, малюнак 1), што таксама адназначна змяняецца з ростам тэмпературы водпуску, на ўчастку рэкамендаванай для атрымання патрабаванага стану тэмпературы водпуску, якая складае 560 °С, адчувальнасць у два разы меншая, чым для максімальнай магнітнай пранікальнасці. Неразбуральны імпульсны магнітны кантроль якасці водпуску свёрдзелаў са сталі Р9 па велічыні астаткавай магнітнай індукцыі B_r (крывая 1, малюнак 1) мае цяжкасці з прычыны неадназначнай залежнасці гэтага стандартнага магнітнага параметра ад тэмпературы даследуемай тэрмаапрацоўкі і яго малой адчувальнасці.

Распрацоўка шматпараметровых рэгрэсійных мадэляў з'яўляецца адным з найбольш простых спосабаў павышэння дакладнасці, стабільнасці і адчувальнасці неразбурваючага кантролю. Выкарыстанне такога падыходу да кантролю якасці водпуску свёрдзелаў з хуткарэзнай сталі Р9 прывяло да добрых вынікаў. На малюнку 2 прадстаўлена залежнасць велічынь тэмператур водпуску, разлічаных па лінейнай рэгрэсійнай мадэлі, у якой выкарыстоўваюцца разгледжаныя стандартныя магнітныя характарыстыкі, ад зададзеных падчас тэрмаапрацоўкі, якія забяспечваюць неабходны для надзейнай эксплуатацыі структурны стан свёрдзелаў.

Атрыманая для разліку тэмпературы водпуску свёрдзелаў са сталі Р9 шматпараметровая рэгрэсійная мадэль па стандартных магнітных параметрах, якая звязвае памераныя пры імпульсным намагнічванні і перамагнічванні ў прахадным датчыку ў разамкнёным магнітным ланцугу каарцытыўную сілу H_c , астаткавую магнітную індукцыю B_r і максімальную магнітную пранікальнасць μ_{max} , мае добрую дакладнасць – каэфіцыент карэляцыі R роўны 0,997, а таксама малы роскід значэнняў –

сярэднеквадратнае адхіленне $\sigma = 0,038$ °С. Аналагічныя велічыні для залежнасці максімальнай магнітнай пранікальнасці ад тэмпературы нагрэву пры водпуску складаюць $R = 0,985$ і $\sigma = 0,085$ °С.



Милюнак 2 – Залежнасць разлічанай па рэгрэсійнай мадэлі тэмпературы водпуску ад зададзенай тэмпературы водпуску свёрдзелаў са сталі Р9

Разгледжаныя стандартныя магнітныя характарыстыкі, памераныя ў прахадным датчыку ў разамкнёным магнітным ланцугу, з'яўляюцца магчымым варыянтам як аднапараметровага (пры выкарыстанні ў якасці інфарматыўнага параметра максімальнай магнітнай пранікальнасці μ_{max}), так і шматпараметровага імпульснага магнітнага кантролю якасці водпуску свёрдзел з хуткарэзнай сталі Р9.

Літаратура

1. Геллер, Ю.А. Инструментальные стали / Ю.А. Геллер. – М.: Металлургия, 1968. – 568 с.
2. Бурак, В.А. Контроль качества термообработки быстрорежущей стали Р9 импульсным магнитным методом / Бурак В.А., Короткевич З.М., Баранов Д.П. // Приборостроение–2012: материалы Междунар. науч.-техн. конференции, Минск, 21–23 ноября 2012 г.; редкол.: О.К. Гусев (председ.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2012. – С. 138–140.
3. Короткевич, З.М. Особенности контроля качества термообработки изделий из стали У8А при двухполярном несимметричном импульсном намагничивании / В.А. Бурак, З.М. Короткевич // Весті НАН Беларусі. Сер.фіз.-тэхн. Навук. – 2019. – № 4. – С. 398–405.
4. Купалова, И.К. Магнитный контроль качества заковки и отпуска быстрорежущих сталей. – Физика металлов и металловедение, 1964, т.18, вып. 1.– С. 39–46.

УДК 621

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ УПРОЧНЕННЫХ СЛОЕВ ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ ПРИ НАЛИЧИИ ТРЕЩИН

Счастный А.С., Осипов А.А.

Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Неразрушающий контроль толщины упрочненного слоя является важным условием, которое обеспечивает долговечность и надежность выпускаемой продукции [1].

Возможность контроля и его надежность существенным образом зависят от различия между магнитными свойствами упрочненного поверхностного слоя и внутреннего незакаленного слоя [2].

Мешающим фактором, влияющим на точность определения толщины упрочненного слоя, является наличие внутри изделия трещин, расслоений или тех или иных неоднородностей структуры, возникающих в процессе производства и/или эксплуатации.

Упрочненный слой и основа моделировались с использованием набора пакета пластин магнитомягкого (сталь В2Ф, ГОСТ 5950-73, $H_c \cong 3400$ А/м) и магнитомягкого (сталь 08Ю, ГОСТ 9045-70, $H_c \cong 320$ А/м) материалов также, как это выполнялось в работе [3].

Наличие зазоров между поверхностями ферромагнитных пластин, составляющих используемый при измерениях набор, является мешающим фактором, который может приводить к существенным ошибкам в измерениях и дальнейшем анализе полученных экспериментальных данных в задачах по неразрушающему контролю структуры изделий импульсным магнитным методом.

Наличие пластин разной толщины, а также различие их механических и магнитных свойств, обеспечивает возможность изучения влияния на результаты контроля толщины упрочненного слоя таких мешающих факторов, как глубина залегания неоднородностей, размеры трещины и т.д.

Толщина магнитомягкого слоя составляла 3 мм, а общая толщина пакета была 7,5 мм. Ширина пакета образцов составляла 20 мм, а длина 180 мм.

Эксперимент выполнялся следующим образом. Сначала осуществлялось размагничивание и намагничивание прибором ИМА-5Б [4] с использованием двух прямоугольных катушек, которые были включены последовательно по полю в образце и имели размеры 100×35 мм², расстояние между центрами катушек составляло 100 мм. Затем намагничивание и измерение последовательно выполнялось датчиком стандартного прибора ИМА-4М [5], расположенным над центром исследуемых образцов (рисунок 1).

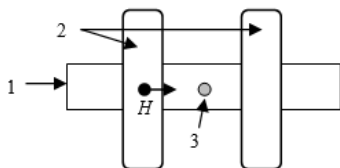


Рисунок 1 – Схема расположения намагничивающих катушек и датчика прибора ИМА-4М:
1 – пакет образцов; 2 – прямоугольные намагничивающие катушки;
3 – датчик прибора ИМА-4М

Для имитации трещин между ферромагнитными слоями пакета применялись немагнитные прокладки трех различных толщин h : 100, 35 и 8 мкм.

На рисунке 2 представлены результаты измерения величины градиента нормальной состав-

ляющей напряженности поля остаточной намагниченности ∇H_r локально намагниченного участка пакета для этих трех толщин h немагнитных прокладок в зависимости от глубины их залегания t .

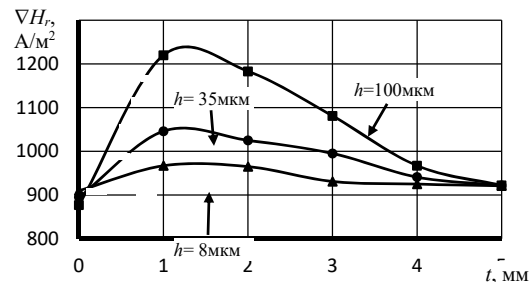


Рисунок 2 – Зависимость градиента напряженности поля остаточной намагниченности ∇H_r от глубины залегания трещины t с различной толщиной h

Из рисунка 2 видно, что максимальная погрешность измерения величины градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности ∇H_r может достигать десятков процентов для толщины прокладки 100 мкм и не превышать десяти процентов при минимальном значении толщины h , то есть результаты измерений различаются в несколько раз по величине. Для всех рассмотренных случаев толщины прокладок h только при глубине залегания t приблизительно равной и превышающей 4 мм погрешность измерения величины остаточной намагниченности ∇H_r не превышает десяти процентов.

Зависимости на рисунке 2 имеют однотипные максимумы, что не позволяет на практике их использовать для однозначного определения глубины залегания трещин. Поэтому при использовании импульсного магнитного метода для контроля толщины упрочненного слоя изделий в производственных условиях рекомендуется предварительно проводить контроль не только поверхностных, но и внутренних трещин и неоднородностей. Влияние поверхностных трещин существенно ниже и соизмеримо с чувствительностью импульсного магнитного метода к зазору между его датчиком и поверхностью контролируемого ферромагнетика.

Исследовалось влияние на измерение величины градиента остаточной намагниченности ∇H_r расположения немагнитной прокладки по длине образца от середины к его краю. Глубина залегания прокладки была выбрана равной 1 мм. Результаты экспериментальных исследований приведены на рисунке 3.

Из рисунка 3 видно, что влияние трещины размерами 20×20 мм² и толщиной 35 мкм на величину остаточной намагниченности ∇H_r не превышает нескольких процентов при смещении прокладки от центра образца приблизительно на

50 мм и более ($x \geq 50$ %). Наличие прокладки под датчиком прибора ИМА-4М приводит к погрешности измерения градиента ∇H_r , приблизительно равной 20 %. Исходя из этого возможно использование импульсного магнитного метода для обнаружения трещин в упрочненных слоях, например, если выполнять их сканирование.

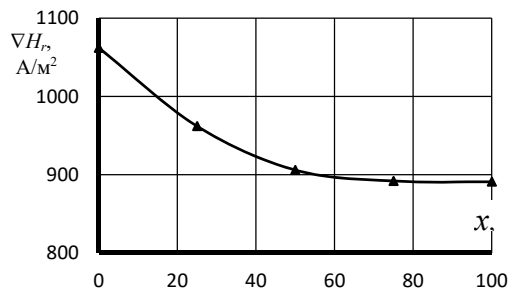


Рисунок 3 – Зависимость градиента напряженности поля остаточной намагниченности ∇H_r от относительного расположения x прокладки (толщиной 35 мкм, шириной и длиной 20 мм) от центра образца к его краю

Очевидно, что проведенный эксперимент не в полной мере учитывает влияние реальной трещины на величину градиента ∇H_r , поскольку трещина возникает в структуре ферромагнетика, а прокладка фактически является дополнительной неферромагнитной структурой, которая изменяет размеры набора пластин и т.д. Однако, в качестве некоторой оценки влияния трещин на результаты контроля толщины упрочненного слоя импульсным магнитным методом такой подход вполне обоснован.

Необходимо также отметить, что влияние реальных трещин на контроль толщины упрочненного слоя импульсным магнитным методом будет существенно ниже, поскольку трещины, которые обычно встречаются на практике, имеют значительно меньшие размеры. Для большей объективности в определении влияния трещин на результаты неразрушающего контроля упрочненного слоя в каждом конкретном случае необходимы дополнительные многосторонние и мно-

гофакторные исследования (с учетом размеров, формы, свойств и т.д. образцов).

По результатам исследований была установлена возможность определения толщины упрочненного слоя по величине градиента напряженности поля остаточной намагниченности [6], но для увеличения надежности и достоверности контроля необходимо проведение предварительной проверки изделий на наличие внутренних трещин и особенно в зоне намагничивания и измерения остаточной намагниченности импульсным магнитным методом. Возможно также применение данного подхода в многопараметровых задачах для увеличения надежности выпускаемой продукции.

Таким образом, проведена оценка влияния неоднородностей структуры на возможность неразрушающего контроля толщины упрочненного слоя при использовании импульсного магнитного метода контроля.

Литература

1. Горкунов, Э.С. Электромагнитные методы и средства контроля качества поверхностного упрочнения стальных изделий / Э.С. Горкунов, Б.М. Лапидус. – Препринт. – Свердловск: УНЦ АН СССР. – 1986. – 48 с.
2. Михеев, М.Н. магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов. – Москва: Наука. – 1993. – 252 с.
3. Матюк, В.Ф. Определение толщины упрочненного слоя по изменениям формы петли гистерезиса / В.Ф. Матюк, А.А. Осипов, В.Б. Кратиров // Дефектоскопия. – 1997. – № 9. – С. 32–41.
4. Мельгуй, М.А. Импульсный магнитный анализатор ИМА-5Б / М.А. Мельгуй [и др.] // Научно технические достижения. – 1990. – № 4. – С. 41–44.
5. Импульсный магнитный анализатор ИМА-4М / В.Ф. Матюк [и др.] // Дефектоскопия. – 2003. – № 3. – С. 47–53.
6. Счастный, А.С. Оценка возможности контроля толщины упрочненных слоев импульсным магнитным методом / А.С. Счастный, А.А. Осипов // Приборостроение-2019: материалы 12-ой Международной научно-технич. конф. – Минск, 13–15 ноября 2019 г. / Минск, БНТУ, 2019. – С. 316–318.

УДК 666.3/7 (075.8)

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЖИГА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ТИТАНСОДЕРЖАЩЕЙ КЕРАМИКИ

Дятлова Е.М.¹, Сергиевич О.А.¹, Колонтаева Т.В.², Бука А.В.¹

¹Белорусский государственный технологический университет
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Введение. Износостойкость – это свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания. Износостойкость

зависит от состава и структуры обрабатываемого материала, исходной твердости, шероховатости и технологии обработки детали, состояния ответной детали. Также существуют методы повышения износостойкости деталей благодаря нанесению

специального износостойкого покрытия на поверхность детали. При этом износостойкость детали без покрытия может быть намного ниже, чем у детали с износостойким покрытием. Важными свойствами для износостойких материалов являются твердость и микротвердость.

Как известно [1], диоксид титана обладает повышенным значением диэлектрической проницаемости и является основным материалом для изготовления «конденсаторной керамики». Современные материалы на основе титановых соединений с металлом по прочности находятся на уровне металлокерамическими системами на основе благородных металлов или сплавов без них. Титановая керамика – это керамика на основе соединений титана. Наиболее широко используется керамика на основе рутила (TiO_2), перовскита (CaTiO_3), титаната стронция (SrTiO_3) и титаната бария (BaTiO_3) [2]. Диоксид титана (TiO_2) используется как модифицирующая добавка, а также в качестве основы радио- и электротехнической керамики, способы получения которой в последние годы претерпели существенные изменения, связанные в первую очередь с расширением области ее применения.

Целью данной работы является разработка составов и технологических параметров синтеза масс износостойкой керамики на основе TiO_2 для изготовления нитепроводителей в текстильной промышленности.

Методология. Керамическая масса готовилась сухим способом путем совместного измельчения определённого количества исходных сырьевых компонентов в планетарной мельнице марки РМ 100 фирмы Netzsch (Германия) в течение 20 мин при скорости вращения барабана 250 об/мин. с последующим магнитным обогащением до остатка на контрольном сите № 0063 в количестве не более 1–2 %. Пресс-порошок влажностью

8–10 % с использованием в качестве связки воды или полуводной дисперсии клея поливинилацетата (ПВА) протирался через сито № 05. Прессование лабораторных образцов (цилиндров \varnothing 20 мм и высотой 20 мм, дисков \varnothing 16 мм и высотой 5–10 мм, плиток (50×50×5) мм и балочек (50×8×8) мм) осуществлялось на гидравлическом прессе ПСУ–50 при давлении 20–30 МПа. Образцы сушились при температуре 100 ± 5 °С в сушильной шкафу типа СНОЛ. Обжиг образцов проводился в лабораторной электрической печи типа SNOЛ 6,7/1 300 в температурном интервале 1 350–1 400 °С со скоростью подъема 200–250 °С/ч и выдержкой при максимальной температуре 1 ч, охлаждение – инерционное.

Экспериментальная часть. В качестве компонентов, улучшающих формовочные свойства композиций, выбраны глина огнеупорная Веселовского месторождения «Керамик-Веско», бентонит огланлыкский, тальк онотский. Химические составы керамических масс представлены в таблице 1.

В результате синтеза были получены образцы-диски диаметром 20 мм. Образцы составов 1, 2, 3 при температурах обжига 1 400, 1 450 °С имели светло-желтоватый цвет, а образцы составов 4, 5, 6 – светло-коричневый. Все образцы имели спекшийся черепок. Общая усадка образцов составила в среднем 5–11 %. Изменение водопоглощения опытных образцов от состава и температуры обжига приведены на рисунке 1.

Можно отметить активизацию спекания образцов № 1, 2, 3 при увеличении температуры обжига, что связано с интенсификацией процессов переноса вещества и увеличения количества расплава, способного к вязкому течению, в результате чего уменьшается водопоглощение и возрастает плотность.

Таблица 1 – Химический состав опытных керамических масс

№ состава	Оксиды и их содержание, %										
	TiO_2	ZrO_2	CaF_2	BaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_2	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	SiO_2	ППП
1	87,04	5,0	1,09	1,55	1,31	0,05	0,06	–	0,07	3,00	0,83
2	89,54	2,5	1,09	1,55	1,31	0,05	0,06	–	0,07	3,00	0,83
3	92,04	–	1,09	1,55	1,31	0,05	0,06	–	0,07	3,00	0,83
4	93,29	–	1,09	–	1,32	0,07	0,69	0,01	0,07	3,00	0,46
5	92,53	–	1,09	–	1,33	0,10	1,31	0,01	0,07	3,00	0,56
6	90,77	–	1,09	–	1,65	0,12	1,94	0,02	0,07	3,00	0,64

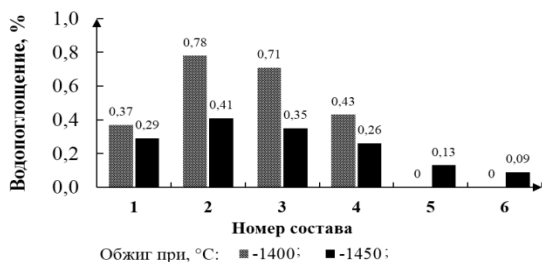


Рисунок 1 – Показатели водопоглощения опытных образцов

При обжиге 1 400 °С изделия имели твердость по шкале Мооса 7,0, при 1 450 °С – 8,0. Микротвердость поверхности необработанных образцов выше, чем после шлифовки, что можно объяснить более мелкозернистой структурой поверхностного слоя, формирующего при спекании на границе раздела фаз, и составляет 4 000–7 900 МПа при 1 400 °С и 7 000–8 100 МПа при 1 450 °С. Зависимость механической прочности опытных образцов от состава и температуры обжига приведена на рисунке 2.

Механическая прочность при сжатии материалов, полученных на основе масс исследуемой системы и обожженных при температуре 1 400 °С, находится в пределах 616,5–627,6 МПа, при температуре 1 450 °С – 619,3–631,5 МПа. Повышение механической прочности материалов при повышении температуры обусловлено интенсификацией процессов образования кристаллических фаз (в основном рутила), обеспечивающих высокие физико-химические свойства, а также увеличением количества образующегося при термообработке расплава, который способствовал заполнению пор, цементированию керамической матрицы образцов и формированию более плотной структуры.

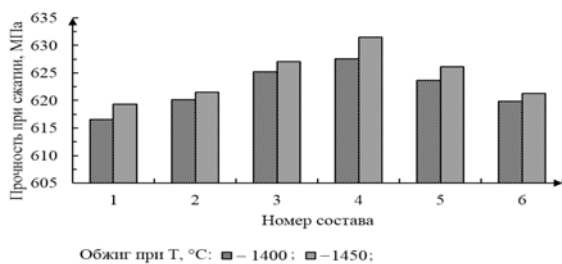


Рисунок 2 – Зависимость прочности при сжатии образцов от состава

Рост показателей ТКЛР, значения которых составляют для всех исследуемых составов (6, 9–7, 8)·10⁻⁶ K⁻¹ при 300 °С, с увеличением температуры обжига объясняется снижением пористости материала и увеличением содержания кристаллических фаз. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что разработанные материалы достаточно устойчивы к агрессивным средам (кислотостойкость составляет 92–94 %, щелочестойкость – 94–97 %). При сопоставлении экспериментально определенных значений межплоскостных расстояний d и относительной интенсивности линий с эталонными дифрактограммами кристаллических фаз было выявлено, что качественный фазовый состав образцов 1, 3, 5, обожженных при температуре 1 400 °С, представлен в основном рутилом, незначительным количеством анатаза и перовскита.

Анализируя полученные данные, в качестве оптимального выбран состав № 5, содержащий диоксид титана, фторид кальция, глину огнеупорную Веселовского месторождения, бентонит огланлыкский, тальк онотский. Образец обладает следующими характеристиками: температура обжига – 1 400 °С, кажущаяся плотность –

3 630 кг/м³, водопоглощение – 0,0 %, открытая пористость – 0,0 %, ТКЛР – 6,63·10⁻⁶ K⁻¹, прочность при сжатии – 619,8 МПа, твердость по Моосу – 7, микротвердость – 8 409,33 МПа.

Результаты оптической микроскопии поверхности образца № 5 и внутреннего скола представлены на рисунке 3.

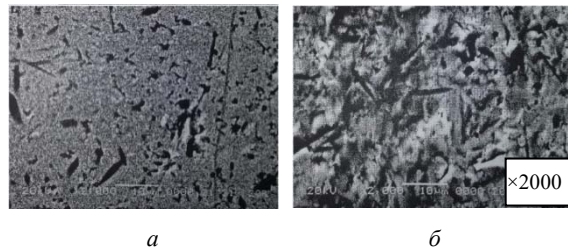


Рисунок 3 – Оптическо-микроскопическое изображение поверхности (а) и скола (б) синтезированных образцов состава 5

Исследование структуры скола и поверхности опытных образцов показало, что на поверхности размер кристаллов значительно меньше, поры практически отсутствуют. Скол характеризуется более гетерогенной структурой, что проявляется в показателях микротвердости.

Заключение. Таким образом, разработанные составы титансодержащих керамических материалов могут быть использованы в электронной, химической и машиностроительной отрасли, а также для получения износостойких деталей для применения на предприятиях легкой промышленности.

В качестве оптимального выбран состав, содержащий диоксид титана, фторид кальция, глину огнеупорную Веселовского месторождения, бентонит огланлыкский, тальк онотский. Образец обладает следующими характеристиками: температура обжига – 1 400 °С, кажущаяся плотность – 3 630 кг/м³, водопоглощение – 0,0 %, открытая пористость – 0,0 %, ТКЛР – 6,63·10⁻⁶ K⁻¹, прочность при сжатии – 619,8 МПа, твердость по шкале Мооса – 7, микротвердость – 8 409,33 МПа.

Литература

1. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ: физические основы и технические приложения трибологии / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М.: ФИЗМАТ ЛИТ, 2007. – 368 с.
2. Белый, А.В. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев / А.В. Белый, Г.Д. Карпенко, Н.К. Мышкин. – М.: Машиностроение, 1991. – 208 с.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ХОЛОДИЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Шумило В.С., Сычик В.А., Уласюк Н.Н.

Международное научное ОО «МАИТ»

Минск. Республика Беларусь

Анализ дефектов холодильной аппаратуры осуществляется на стадии выходного контроля путем точного измерения интенсивности оптических излучений ИК-диапазона от поверхности хладоэлементов, величина которой J_0 отражает целостность структуры контролируемых хладоэлементов и герметичность их соединений. Как показали результаты экспериментальных исследований, в качестве сигнала использовано температурное поле поверхности конденсатора на его входе и выходе, которое является источником информации о процессе теплопередачи, отражающем надежность механических соединений, наличие внутренних или наружных дефектов – скрытых раковин, трещин, инородных включений, т.е. возможных отклонений физических свойств объекта от нормы.

Дефектную поверхность хладоэлемента можно представить в виде анизотропной структуры с порами и включениями. Она может быть отражена в форме, представленной на рисунке 1, базовой ячейкой, в которой элемент 2 – это микротрещина, а элемент 3 – инородное включение.

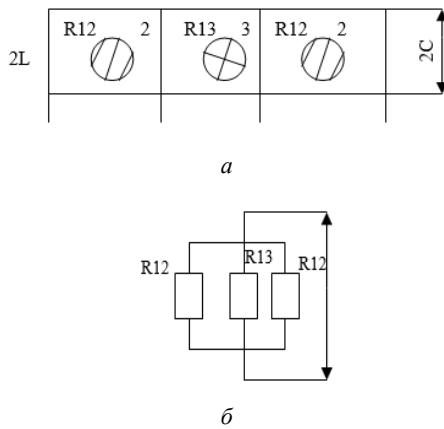


Рисунок 1 – Анизотропная структура базовой ячейки поверхности хладоэлемента (а); схема соединения тепловых сопротивлений базовой ячейки (б)

Эффективная теплопроводность такой дефектной структуры хладоэлемента в форме базовой ячейки находится из выражения [1]

$$\lambda = \lambda_1 \left[1 - \frac{m_2}{1(1-\nu) - (1-m_2)/3} \right]. \quad (1)$$

Здесь $m_2 = \nu_2/\nu$ – объемная концентрация включений; ν_2/ν – объемы включений и всей ячейки; $\nu = \lambda_1/\lambda_2$; λ_1 – λ_2 – теплопроводность основного материала и включений.

Тепловое сопротивление соответствующего элемента базовой ячейки может быть найдено как

$$R_i = \frac{l_i}{S_i \lambda_i}, \quad (2)$$

причем l_i , S_i , λ_i – соответственно длина, площадь элемента и его теплопроводность.

В соответствии со схемой соединения тепловое сопротивление элементарного массива анизотропной структуры с порами и включениями

$$R = \frac{R_{12} R_{13}}{N R_{12} + K R_{13}} = \frac{2\ell}{\lambda S}. \quad (3)$$

Здесь $S = (N + K) 4\ell^2$, N и K – число включений типа 2 и 3.

Выражение (2) позволяет определить тепловое сопротивление дефектного участка хладоэлемента, по величине которого оценивается разность температур ΔT дефектной и бездефектной областей.

Основным информационным параметром при анализе качества холодильной аппаратуры является локальная разность температур между дефектной T_A и бездефектной T_B областями объекта $\Delta T = T_A - T_B$. При этом знак перепада ΔT зависит от соотношения теплофизических свойств дефекта и изделия исследуемой поверхности. При нагреве изделий, содержащих плохо проводящие теплодефекты (газовые включения, неоднородности структуры, микротрещины) перепад положительный для поверхности, подвергнутой нагреву ($\Delta T > 0$) и отрицательный для противоположной стороны. Величина перепада температур на входе и выходе конденсатора хладоэлемента зависит от дефектности структуры, избытка или недостатка хладагона в системе, качества вакуума в системе, степени ее засорения и в общем случае для его определения используем уравнение теплопроводности и конвекции

$$a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \left(W_x \frac{\partial T}{\partial x} + W_y \frac{\partial T}{\partial y} + W_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{q}{\lambda/c\rho} = 0.$$

Здесь W_x , W_y , W_z – составляющие скорости движения компонент системы по координатам; q – плотность теплового потока, Вт/м²; $a = \lambda/c\rho$ – коэффициент температуропроводности; c , ρ – теплоемкость и плотность образца.

В квазистационарном режиме тепловые перепады ΔT на выходе и входе конденсатора можно определить из зависимости $\Delta T = R_{\Sigma} \cdot P$.

$$\text{где } R_2 = 1/\alpha_n S_n + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i S_i} -$$

тепловое сопротивление участка конденсатора на его входе (выходе); λ_i, δ_i, S_i – коэффициент теплопроводности, толщина и площадь дефектной области конденсатора; $1/\alpha_1 S_n$ – тепловое сопротивление между областью конденсата площадью S_n и воздушной средой; α_1 – коэффициент теплообмена.

Температура $T_{m,m+1}$ на стыке m и $(m+1)$ дефектных слоев конденсатора рассчитывается по формуле [2]

$$T_{m,m+1} = T_1 - \frac{1}{R} \left(\frac{1}{\alpha_1 S_n} + \sum_{i=1}^m \frac{\delta_i}{\lambda_i S_i} (T_1 - T_2) \right), \quad (4)$$

где

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i S_i} -$$

тепловое сопротивление области конденсатора без учета конвективного теплообмена между конденсатором хладагента и окружающей средой.

Важнейшим параметром неразрушающего контроля дефектов структуры хладоэлементов, обеспечивающим точную разбраковку холодильных аппаратов на стадии выходного контроля при многократном снижении длительности процесса выявления дефектов, является время установления заданного перепада температур между поврежденными участками структуры конденсатора хладоэлемента на его поверхности. Этот температурный перепад ΔT_r наступает за время t_r , когда процесс нагрева конденсатора выходит на регулярный режим. Показано [3], что на стадии регулярного режима нагрева дальнейшее повышение температуры конденсатора идет с постоянным перепадом температур ΔT_r между участками его структуры с различным тепловым сопротивлением. Перепад температур ΔT_r является основным информационным параметром по выявлению дефектных участков хладоэлемента.

Время выхода процесса нагрева конденсатора на регулярную стадию t_r в нагрузочном режиме зависит от мощности источника нагрева P , теплового коэффициента тела F и в общем случае определяется из зависимости

$$\frac{1}{mF_j} \frac{d(\Delta T_j)}{dt} + \frac{1}{F_j} \Delta T_j = p. \quad (5)$$

Здесь m – темп охлаждения (нагрева) тела. При вычислении темпа нагревания конденсатор хладоэлемента представлен системой из двух тел – ядро произвольной формы и окружающей его оболочки, для которой

$$m = S_1/C(1/\alpha + \delta/\lambda),$$

где S_1, δ, λ – площадь внешней поверхности,

толщина и коэффициент теплопроводности оболочки; C – полная теплоемкость ядра; α – коэффициент теплоотдачи.

С учетом (7) время выхода процесса нагрева тела

$$t_r = \frac{1}{m} \ln T_2/T_0,$$

где T_0 – начальная температура конденсатора.

Поскольку выход на регулярную стадию режима нагрева тела наступает при изменении (повышении) его начальной температуры в ϵ раз, из (9) следует, что время выхода процесса нагрева конденсатора на регулярный режим $\Delta t \equiv \Delta t_{max}$, то есть перепад температур представляет достоверный информационный сигнал о наличии структурных дефектов в хладоэлементе, $t_r = 1/m$.

С целью обеспечения заданной точности контроля дефектов хладоэлементов введен коэффициент временного запаса K_t , который составил $K_t = 1,3$. Поэтому оптимальный интервал времени от момента включения в работу холодильного аппарата до начала измерения температурного поля конденсатора составляет $t_{ropt} = K_t t_r = 1,3 t_r$.

В результате обработки экспериментальных данных и проведенных испытаний установлены значения t_{ropt} для всех базовых типов холодильных аппаратов, изготавливаемых на ЗАО «Атлант». Значения для указанных аппаратов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Тип холодильного аппарата	KSH-212	KSH-216	KSH-215	KSHD-126	KSHD-128	KSHD-130
t_{ropt} , мин.	9,5	10,0	10,0	13	15	15

Другим ключевым параметром, оценивающим работоспособность холодильных аппаратов, является величина тепловых перепадов ΔT и локальность их концентрации. Результаты расчета по формулам (5), (6) и экспериментальных исследований по выявлению дефектов в хладоэлементах с помощью сравнительных измерений высокочастотным электромагнитным дефектоскопом типа ВД-22Н и предложенным методом показали, что минимальная граница тепловых перепадов для указанных в таблице 1 типов холодильных аппаратов составляет 0,9–1,3 °C.

Локальные перепады температуры по поверхности конденсатора характеризуют качество его структуры. Кроме выявления указанных дефектов контроль в холодильной аппаратуре таких важных параметров, как недостаток или избыток хладона в системе, степень засоренности системы хладоэлемента, уровень вакуума в системе. Указанные параметры определяются по разности температуры на входе и выходе конденсатора $T_{вв}$, величина которой определяется с помощью специального устройства контроля оптической информации.

Выводы. Важнейшим фактором точного контроля дефектов в холодильных аппаратах является время установления перепада температур между поврежденными участками структуры конденсатора хладоэлемента на его поверхности.

Ключевым параметром разработанной методики неразрушающего контроля качества холодильных агрегатов является величина тепловых перепадов на поверхности конденсатора и локальность их концентрации.

Литература

1. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. - Л.: Энергия, 1994. – 264 с.
2. Сычик В.А., Шумило В.С., Черняк Г.И. Тепловой контроль дефектов хладоэлементов электронной техники/ Материалы международной 51-й НТК БГПА. – Минск, ч. 4, 1995. – С. 33.
3. Сычик В.А., Уласюк Н.Н., Шумило В.С. и др. Оценка качества структуры ЭИ/ Материалы международной 53-й НТК БГПА. - Минск, 1999, ч. 2. – С. 26.

Секция 4. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681.7. (075.8)

ИЗМЕРЕНИЕ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ ОБЪЕКТИВА

Альхимович М.А.^{1,2}, Кузнецик В.О.²

¹Научно-технический центр «ЛЭМТ» БелОМО

Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Объективы являются самым распространённым типом оптических систем, применяемых в оптико-электронном приборостроении, от качества изготовления и сборки которых зависит работа прибора в целом.

Типовые задачи оптического производственного контроля сводятся к измерению характеристик оптических систем и качеству их изображения визуальным или фотоэлектрическим методами.

К основным характеристикам объектива, требующим измерения и аттестации, в первую очередь относятся фокусное расстояние, разрешающая способность, функция рассеяния точки и функция передачи модуляции.

В настоящее время в практике оптической измерительной лаборатории чаще используются фотоэлектрические методы контроля, чем визуальные. Данные методы позволяют создавать автоматизированные приборы и системы, работающие в видимой и ИК области спектра, имеющие специальное программное обеспечение, с помощью которого объективная измерительная информация представляется в удобном для оператора виде. В отличие от них визуальные методы более сложные и трудоёмкие и требуют высокой квалификации оператора, однако они позволяют использовать универсальные базовые установки, такие как оптическая скамья.

При выборе метода измерения необходимо учитывать численное значение измеряемой величины и её допустимое отклонение от заданного, оснащение измерительной лаборатории, наличие и возможность изготовления на производстве дополнительных приспособлений для реализации метода.

Учитывая выше сказанное необходимо было исследовать фокусное расстояние объективов визуальным и фотоэлектрическим методами, сравнить полученные результаты и сделать выводы о том, на каких этапах производства и для каких объективов могут применяться визуальные методы в оптическом и оптико-электронном производстве.

Исследования проводились коллимационным методом, который отличается от других методов простотой реализации и наглядностью.

Визуальный метод осуществлялся на оптической скамье ОСК–2ЦЛ, которая предназначена для исследования объективов оптических и оптико-электронных приборов по качеству изображения и для измерения их оптических характеристик. В состав экспериментального стенда (рисунок 1) входят осветитель, коллиматор с тест-объектом, испытуемый объектив, закрепленный в специальной оправе-держателе и горизонтальный измерительный микроскоп с окуляр-микрометром.



Рисунок 1 – Общий вид экспериментального стенда для контроля фокусного расстояния

Автоматизированный режим был реализован с помощью измерительной установки OTS 200 (рисунок 2) фирмы OEG GmbH (Германия). Основными компонентами установки являются: базовая рама с интегрированным коллиматором; моторизованный программно управляемый механизм смены эталонных пластин; измерительная головка; моторизованная программно управляемая Z-ось для высокоточного позиционирования измерительной головки, обеспечивающая точное определение положения плоскости изображения.



Рисунок 2 – Общий вид установки серии OTS

Наиболее распространенным методом измерения фокусных расстояний (f') объективов является метод линейных увеличений, реализуемый как с помощью визуального, так и фотоэлектрического метода.

Суть метода увеличений заключается в измерении величины изображения тест-объекта (y') полученного в фокальной плоскости контролируемого объектива и последующем расчете фокусного расстояния исследуемой оптической системы (f') с учетом размера тест-объекта (y) и величины фокусного расстояния объектива коллиматора (f_k) измерительной установки по формуле:

$$f' = f_k y' / y. \quad (1)$$

Схема измерения размера изображения, визуальным методом на оптической скамье ОСК-2ЦЛ, представлена на рисунке 3 [1].

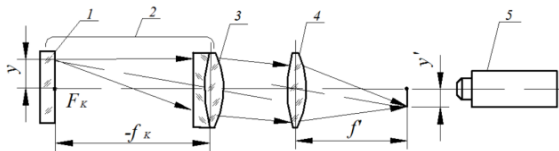


Рисунок 3 – Схема измерения фокусного расстояния объектива методом линейного увеличения:

- 1 – мира; 2 – коллиматор; 3 – объектив коллиматора; 4 – контролируемый объектив; 5 – микроскоп с винтовым окулярным микрометром

Измерение проводилось на оптической скамье с использованием микроскопа (I), входящего в её состав (рисунок 4, а) и модернизированного (II), с целью повышения точности снятия отсчетов, микроскопа с окуляр-микрометром и автоматическим выводом значений линейного перемещения микроскопа на экран (рисунок 4, б).

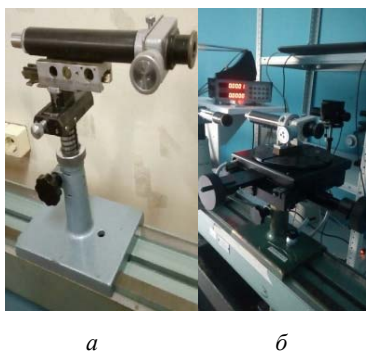


Рисунок 4 – Общий вид микроскопа с окуляр-микрометром

Объектом исследований являлись проекционные объективы 9/115 и 7/206.

Методика измерения фокусного расстояния объектива сводится к следующему.

Перед началом измерений необходимо установить тест-объект в виде штриховой миры точно в фокусе длиннофокусного объектива коллиматора

($f'_k = 1600$ мм). После чего контролируемый объектив устанавливают между коллиматором и измерительным микроскопом и юстируют его на оптической скамье. Перемещением микроскопа вдоль оптической оси необходимо добиться наиболее резкого изображения миры наблюдаемого через окуляр микроскопа, которое должно занимать около 2/3 поля зрения микроскопа. Изображение предмета y' , даваемое проверяемым объективом в его фокальной плоскости, измеряют путем наведения микроскопа на горизонтальные штрихи миры (база миры), перемещая микроскоп перпендикулярно оптической оси. Отсчет снимают по винтовому окуляр-микрометру. Искомое фокусное расстояние вычисляют по формуле (1).

Погрешность метода измерения, зависящая от погрешности измерения размера изображения, связана с инструментальной погрешностью окуляр-микрометра, погрешностью изготовления шкалы, погрешностью продольного наведения микроскопа на изображения, погрешностью поперечной наводки перекрестия окуляр-микрометра на изображение штрихов шкалы, квалификации оператора и других. Относительная погрешность определения величины фокусного расстояния составляет 0,3 %–0,6 % [1].

Замена микроскопа I на модернизированный микроскоп II позволила повысить быстродействие снятия отсчета и его точность.

Измерение фокусного расстояния объектива на установке OTS 200 осуществлялась в проходящем свете, как и в предыдущих случаях. Благодаря автоматической фокусировке, за счет использования датчиков перемещения, замене окуляра цифровой камерой, а также электронной обработке и оценке данных, обеспечивается высокая точность (погрешность измерения 0,05–0,2 %) и достоверность результата, быстродействие, устраняется субъективная ошибка присутствующая визуальным методом.

Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерений фокусного расстояния f' проекционного объектива

Характеристика	Контрольные образцы					
	Объектив 9/115			Объектив 7/206		
						
	Оптическая скамья	Установка OTS	Оптическая скамья	Установка OTS		
	микро-скоп I	микро-скоп II	–	микро-скоп I	микро-скоп II	–
f' , мм	115,35	115,28	114,86	204,97	205,17	205,67
Погрешность, %	0,30	0,24	0,12	0,5	0,4	0,16

На основании полученных результатов измерения фокусных расстояний объективов на оптической скамье можно сделать вывод о том, что визуальные методы контроля могут быть использованы для контроля объективов оптико-электронных приборов на всех этапах его изготовления; модернизация микроскопа позволяет повысить точность и удобство измерений. Использование для контроля автоматизированных измерительных установок типа OTS 200 позво-

ляет повысить точность и производительность измерений, однако это требует больших экономических затрат, так как установки данного класса в зависимости от оснащения стоят от 56 тысяч евро.

Литература

1. Креопалова Г.В. Оптические измерения / Г.В. Креопалова, Н.Л. Лазарева, Пуряев Д.Т. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.

УДК 666.1.056.64

ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОПТИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ЛАЗЕРНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ

Богданович Д.А.^{1,2}, Мандик Н.С.^{1,2}, Федорцев Р.В.¹

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Для улучшения выходных характеристик прибора в целом на рабочие поверхности оптических деталей, как правило, наносят различного рода многослойные интерференционные покрытия. При выборе типа покрытия необходимо учитывать конструктивные и технологические требования, предъявляемые как отдельно к детали, так и к прибору в целом.

Существует ряд оптических приборов, в качестве источника излучения в которых используются лазерные модули. Одним из них является лазерный телескоп, основная функция которого заключается в расширении входного пучка лазерного излучения посредством телеобъектива. Применяемая для этих целей плосковыпуклая линза должна удовлетворять следующим требованиям: на обе поверхности необходимо нанести просветляющие покрытия с рабочим спектральным диапазоном $\lambda = 690\text{--}1000$ нм, остаточным коэффициентом отражения $\rho_{\text{ост}} < 0,7\%$, углом падения луча $\alpha = 0^\circ$, лучевой стойкостью $DT > 5\text{ Дж/см}^2$, длительностью импульса $\tau = 10$ нс.

Исходя из указанных технических требований к данной детали, применение стандартного ахроматического покрытия на основе оксида алюминия, фторида магния, или двуокиси циркония – оказывается невозможным. Для фторида магния в частности характерна низкая лазерная прочность, поэтому данный вид покрытия используется в обычных телескопических системах и микроскопах. Более высокой лучевой стойкостью обладают покрытия из двуокиси циркония и двуокиси кремния [1].

Расчёт широкополосных просветляющих покрытий проводили в программном пакете «Opti Layer». В качестве исходных данных были зада-

ны: рабочий спектральный диапазон и угол падения входного луча. Произвели выбор материалов покрытия: двуокись кремния и двуокись циркония, которые обеспечивают рабочую лучевую стойкость покрытия на уровне 10 Дж/см^2 . В процессе расчёта определили коэффициенты отражения в исследуемом диапазоне, оптимальное количество слоёв – 8 чередующихся слоёв $(\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2)_4$ и их оптические толщины: 1 слой – $0,24\ \mu\text{м}$; 2 – $0,5\ \mu\text{м}$; 3 – $2,55\ \mu\text{м}$; 4 – $2,31\ \mu\text{м}$; 5 – $2,16\ \mu\text{м}$; 6 – $2,5\ \mu\text{м}$; 7 – $0,67\ \mu\text{м}$; 8 – $1,46\ \mu\text{м}$ [2]. Контрольная длина волны $\lambda = 578$ нм. Показатель преломления для контрольной длины волны для ZrO_2 $n = 2,378$, а для SiO_2 $n = 1,458$ (рисунок 1).

Перед началом процесса напыления все подложки очищались от налёта, пыли, остатков полирита и других посторонних включений. С этой целью детали помещаются в специальные ванны с кислотами и щелочами. На финишной стадии очистки проводили при помощи спирто-эфирной смеси или ацетона.

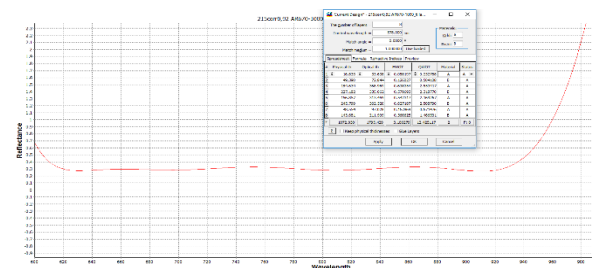


Рисунок 1 – Кривая отражения и основные параметры оптического покрытия

Камера вакуумной установки очищается от осевших материалов при испарении на предыдущих этапах напыления, с помощью гибкого абразивного материала на тканевой или бумаж-

ной основе с нанесенным на неё слоем абразивного порошка.

Процесс напыления выполнялся в вакуумной установке «Ortus» (ООО «IZOVAC»), (рисунок 2) методом электронно-лучевого испарения. На купол установки в 2 ряда были заложены оптические подложки из стекла К8.

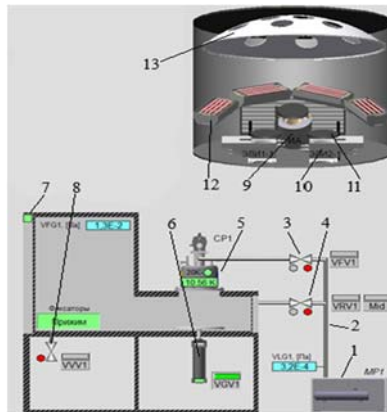


Рисунок 2 – Схема вакуумной установки:

- 1 – механический насос; 2 – форвакуумная линия;
3 – клапан откачки криогенного насоса; 4 – клапан откачки камеры; 5 – криогенный насос; 6 – затвор;
7 – датчик открытия двери; 8 – клапан напуска в камеру; 9 – источник ассистирования;
10 – электронно-лучевой испаритель; 11 – заслонка;
12 – нагреватели; 13 – карусель

Подготовительное время к процессу напыления занимает около 4 часов. Несколько часов приходится на заморозку криогенного насоса, создания и поддержания необходимого вакуума в камере ($P = 2,5 \cdot 10^{-3}$ МПа). Проведена серия экспериментов по определению оптимальной температуры осаждения материалов для данного процесса. Установлено, что температура в $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ является оптимальной для осаждения тонкопленочных материалов. Основной технологический процесс напыления занимает около 50 минут. Скорость напыления контролируется различными способами, в зависимости от испаряемого материала: так, например, в данной установке используется гранулированный кварц чистоты 99,99 %, размеры гранул колеблются в диапазоне 0,2–0,7 мм. Гранулы помещаются во вращающийся медный цилиндрический тигель, что обеспечивает наилучшую равномерность испарения. В тоже время скорость напыления зависит от частоты вращения тигля и от величины тока ионного источника, чем медленнее вращается тигель, тем быстрее происходит испарение материала. Таблетированный материал, двуокись циркония, размеры таблеток которого составляют в диаметре 17 мм (а также фторид магния, оксид ниобия и другие) помещаются в лодочки тигля, где оператор контролирует положение пучка при помощи магнитной катушки, сканируя поверхность испаряемых материалов,

обеспечивает необходимую скорость напыления, за счёт изменения силы тока.

Каждый материал имеет свои особенности испарения, такие как: мощность ионного источника и характер испарения. Любой материал перед процессом напыления необходимо отжечь, чтобы он перестал выделять газы, поскольку в процессе напыления дополнительные примеси будут оседать на поверхности детали и повлияют на коэффициент преломления на всей толщине слоя, что отрицательно скажется на качестве покрытия. Одной из важных составляющих для получения хорошего покрытия является обеспечение высокого коэффициента отражения на каждом слое, чего можно добиться правильным характером испарения материала. При медленном испарении материалов, пленки зачастую образуют зернистую структуру, из-за чего увеличивается электрическое сопротивление и покрытия начинают поглощать падающее на них излучение. Двуокись циркония, используемая в данном процессе, должна испаряться тонкими слоями с поверхности таблетки, чего можно добиться непрерывным равномерным сканированием её поверхности ионным пучком. Однородность покрытия обеспечивается равномерной скоростью испарения, которая подбиралась исходя из аналитического опыта напыления материалов предыдущих покрытий. Оптимальная скорость испарения для циркония составляет около 5 А/с, а для двуокиси кварца 10–15 А/с.

Так, например, таблетированный оксид ниобия необходимо отжигать около 5 минут, до полного прекращения бурления на поверхности материала и полной остановки таблетки (в момент отжига таблетка под воздействием лазерного излучения перемещается по лодочке). Порошкообразный кварц достаточно отжечь в течении 1,0–1,5 минут. Уже после одного круга образуется тонкая пленка на поверхности данного материала, которая не даст вылететь остальному материалу и обеспечит хороший контроль. Двуокись циркония ведет себя очень спокойно в момент отжига, таблетку достаточно просканировать всего лишь 30–40 секунд по всему периметру материала, причем цвет её должен быть ярко-красный.

При напылении широкополосных и других сложных процессов чаще всего используется метод активного контроля по пролетающему свидетелю, в ходе которого измерение происходит непосредственно по напыляемой поверхности, что уменьшает погрешность разброса данных с измерительного прибора и охватывает всю необходимую область спектра. В других случаях, то есть при напылении однослойных или двухслойных покрытий, можно использовать центральный контроль, который происходит непосредственно на определенной длине волны.

Посредством системы фотометрического контроля «Invisio M» (ООО «IZOVAC»), в проходящем свете осуществляли измерение толщины напыляемого слоя на длине волны 200–2600 нм.

До начала процесса оператор должен рассчитать оптимальные точки (желательно минимумы и максимумы), которые облегчают процесс контроля покрытия. Подбор контрольных точек помогает определить возможное перепыление или недопыление испаряемого материала. При напылении многослойных покрытий необходимо менять контрольные точки на всем заданном диапазоне длин волн, чтобы обеспечить необходимое качество покрытия. Результат напылённого седьмого слоя представлен на рисунке 3.

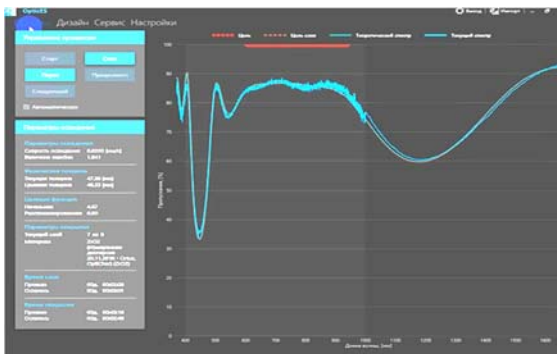


Рисунок 3 – Результат напыления промежуточного 7 слоя

В момент расчёта покрытия необходимо также учитывать спектральные сдвиги. При открытии вакуумной камеры спектральная кривая сдвигается в длинноволновую область, поэтому на этапе предварительного расчёта необходимо сместить его в коротковолновую область на некоторую величину. Кроме того, каждое оптическое покрытие подвержено старению, при котором происходит смещение последнего в длинноволновую область, что тоже необходимо учитывать при проектировании оптического покрытия [3]. Так как в данном случае использовался метод пролетающего контроля, приёмник излучения препятствовал распространению газового факела, и потребовалось удлинить исходный график. При завершении слоя оператор должен учитывать инерционность срабатывания и время закрытия заслонок, то есть закрывать заслонки раньше прекращения напыления слоя за 10–15 нм. Учитывать тот фактор, что после воздействия

ионного луча происходит остаточное осаждение газов, находящихся в камере на детали.

Для проверки соответствия нанесенного оптического покрытия расчётным теоретическим кривым, после завершения процесса напыления был осуществлен контроль данных деталей на спектрофотометре «Photon RT» компании «Es-sentOptics». Перед началом контрольного сканирования, проводили калибровку прибора, где указывали спектральный диапазон, угол падения излучения, шаг сканирования, ширина щели, режим измерения (пропускание, отражение) и тип поляризации.

Через неделю проводится повторный контроль деталей для определения коэффициента смещения покрытия, связанного со старением и соответствия данных спектральной кривой заданным техническим требованиям. Спектральный график отражения представлен на рисунке 4.

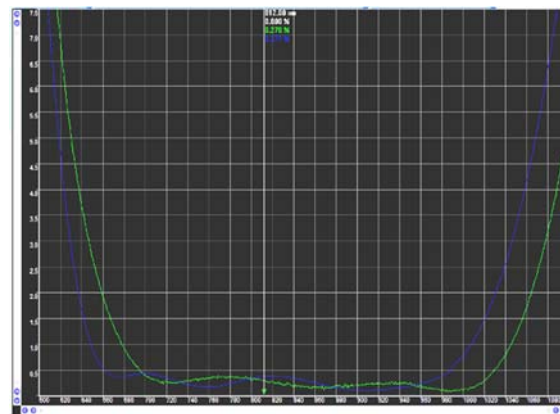


Рисунок 4 – Спектральный график отражения оптического покрытия

Из анализа представленных графиков видно, что полученный результат удовлетворяет техническим требованиям, предъявляемым к данным оптическим деталям и составляет в наивысших точках 0,27 % и 0,37 % отражения.

Литература

1. ОСТ 3-1901-95 Покрытия оптических деталей Типы, основные параметры и методы контроля.
2. Фурман Ш.А. Тонкослойные оптические покрытия / Л.: «Машиностроение», 1977. – 264 с.
3. Окатов М.А. и др. Справочник технолога-оптика. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2004. – 679 с.

УДК 535.243.3

АВТОНОМНЫЙ МНОГОКАНАЛЬНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ СЕНСОР ДЛЯ БПЛА Бручковский И.И., Литвинович Г.С., Попков А.П., Цикман И.М., Домарацкий А.В.

*Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Актуальной задачей дистанционного зондирования является измерение коэффициентов спектральной яркости природных объектов, с целью расчета из них значений характеристических индексов для их сопоставления с результатами авиационных и спутниковых измерений.

В частности, интерес представляет задача дистанционного мониторинга состояния здоровья хвойных лесов, так как за последние десятилетия состояние хвойных лесов Беларуси значительно ухудшилось вследствие изменения климатических условий, что привело к распространению вершинного короеда и других заболеваний.

Методика мониторинга состояния хвойных древостоев может включать в себя в том числе лабораторные спектрометрические измерения образцов хвои, откуда возникает задача выполнения корректного сравнения лабораторных данных и данных, полученных при помощи спектрометра на авиационной платформе. Использование фото-спектральных данных, полученных с борта самолета соответствующей аппаратурой, имеет особенность, состоящую в отсутствии априорной информации о характеристиках изучаемого объекта.

Однако, при использовании управляемого беспилотного летательного аппарата (БПЛА) существует возможность избирательного спектрометрирования заранее определенных объектов с известными характеристиками.

Таким образом, цель данной работы состояла в разработке и реализации автономного и облегченного варианта многоканального спектрального сенсора, размещаемого на платформе БПЛА, для задачи регистрации спектров отдельных деревьев с близкого расстояния в надирной геометрии наблюдений и проведение летных измерений.

В данной работе представлен вариант исполнения автономного многоканального спектрального сенсора, который был успешно использован для автоматической регистрации фото-спектральных данных с использованием в качестве БПЛА вертолета UVH-25EL (четырёхтактный бензиновый двигатель, полезная нагрузка 5 кг, дальность полета 350 км, взлетная масса 42 кг).

Автономный многоканальный спектральный сенсор АМСС-1 (рисунок 1) представляет собой совокупность смонтированных на жестком основании сенсоров, для которых осуществлена однозначная привязка по полям зрения, что позволяет поставить в соответствие регистрируемые изображения и данные спектрометра, а также определить угловые параметры каждого сенсора.

В состав АМСС-1 входят: спектрометр ФСП-04 [1] с закрепленным на его корпусе смартфоном для регистрации фотоизображений, а также четырехполосный, спектральный датчик Parrot Sequoia [2] (зеленый 550 мкм, красный 660 мкм, ближний ИК 790 мкм с шириной полосы пропускания 40 мкм и еще один красный канал 735 мкм шириной полосы пропускания 10 мкм) с режимом съемки один раз в секунду.

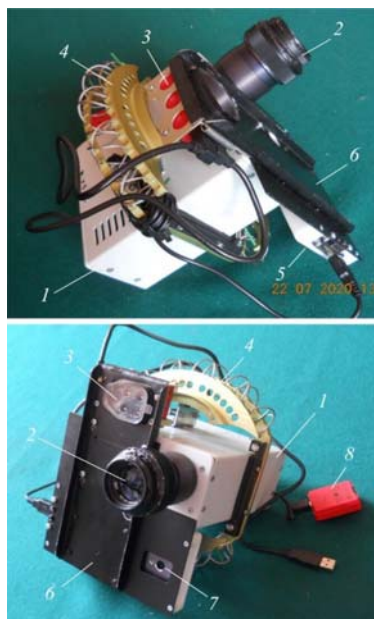


Рисунок 1 – Комплекс аппаратуры для съемки с БПЛА «КА – БПЛА»:

- 1 – ФСП 04; 2 – объектив ФСП-04; 3 – камера Parrot Sequoia; 4 – блок виброразвязки; 5 – смартфон; 6 – кронштейн «КА – БПЛА»; 7 – объектив камеры смартфона; 8 – сенсор освещённости камеры Parrot Sequoia

Синхронизация детекторов АМСС-1 в данном случае не требуется, так как вертолет способен зависнуть над исследуемым деревом на несколько минут, в течение которых существует возможность произвести регистрацию серии спектров яркости отраженного от объекта солнечного излучения, а также зарегистрировать мультicanaльное изображение при помощи камеры Parrot Sequoia [2]. Чувствительность детектора Baumer такова, что регистрация изображения занимает десятки микросекунд, таким образом, регистрируемое изображение имеет минимальные значения смаза, обусловленного движением авиационной платформы. Таким образом, все сенсоры работали в режиме автоматической регистрации сигнала.

На рисунке 2 представлен вид АМСС-1, подготовленного для проведения измерений в надириной геометрии наблюдений.



Рисунок 2 – БПЛА UVH-25EL с установленным АМСС-1 перед вылетом



Рисунок 3 – Вид исследуемого объекта, красным отмечено поле зрения спектрометра ФСП-04

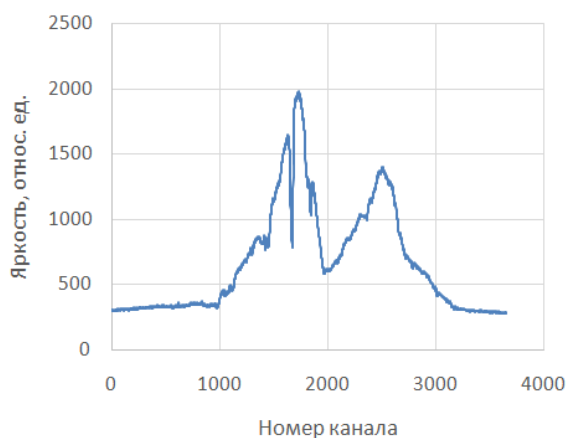


Рисунок 4 – Спектральные данные, получаемые при помощи спектрометра ФСП-04 прибора АМСС-1

За время полета 1 час 50 минут прибором АМСС-1, установленном на платформе БПЛА UVH-25EL, было получено 722 спектра выбранных деревьев в режиме автоэкспозиции и 1508 спектральных снимка в каждом из четырех каналах для сенсора Parrot Sequiola.

На рисунках 3 и 4 представлен пример данных обзорной камеры и соответствующий спектр отражения исследуемого объекта, получаемых при помощи АМСС-1.

Для расчетов коэффициентов спектральной яркости исследуемых объектов синхронно со съемками с вертолета на поверхности земли в статичном положении выполнялись измерения молочного стекла спектрометром ССП-600 [3], входящим в состав установки для измерений эталонных спектров. Режим съемки спектрометра – непрерывный с автоэкспозицией, с периодичностью около трех раз в секунду.

Полученный набор фото-спектральных данных использовался для генерации цветowych карт индексных изображений, посредством которых можно получить высококонтрастные индексные изображения, на которых выделяются классы здоровых насаждений, сухих насаждений, подлеска. Важно отметить, что практическое применение методов обработки мультиспектральных изображений чувствительно к высоте полета авиационной платформы, так, наилучшие результаты для использованного сенсора были получены на небольших высотах – до 50 м.

Литература

1. Катковский Л.В., Беляев Б.И., Сосенко В.А., Абламейко С.В. Аппаратно-программный комплекс «Калибровка» для наземного спектрометрирования подстилающей поверхности и атмосферы // *Материалы 7-го Белорусского космич. конгресса.* – Минск, 2017. – Т. 2. – С. 36–40.
2. Parrot Sequiola [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.parrot.com/en/shop/accessories-spare-parts/other-drones/sequoia>. – Date of access: 08.10.2020.
3. Бручковская С.И., Литвинович Г.С., Бручковский И.И., Катковский Л.В. Алгоритм коррекции дифракции второго порядка в спектрометре с вогнутой дифракционной решеткой // *Журн. приклад. спектроскопии.* – Минск, 2019. – Т. 86, № 4. – С. 620–627.

УДК 535.243.3

МУЛЬТИКАНАЛЬНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ СЕНСОР МКСС-1 Бручковский И.И., Литвинович Г.С., Силюк О.О., Домарацкий А.В.

*Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Для решения задач дистанционного зондирования растительных объектов с использованием авиационной платформы возникает необходимость получения мультиканальных фотографий и коэффициентов спектральной яркости исследу-

емых объектов. В зависимости от применяемой методики восстановления параметров исследуемого растительного объекта зачастую требуется дополнительная информация, для получения которой необходимы новые аппаратные средства.

В частности, для решения задачи классификации хвойных древостоев оптическими дистанционными методами требуется проведение многоуровневого эксперимента, включающего в себя спектрометрирование отдельных деревьев с высоты 150–300 м с возможностью постановки в соответствие зарегистрированному спектру объекта на карте подстилающей поверхности. При решении такой задачи необходимо учитывать быстродействие применяемой аппаратуры, ее угловые характеристики а также высоту и скорость движения авиационной платформы с тем, чтобы реализовать фото-спектральную систему, способную регистрировать коэффициенты спектральной яркости отдельных деревьев с воздуха.

Особенность задачи классификации хвойных древостоев оптическими дистанционными методами состоит в том, что для своего решения она может требовать комплексных лабораторных, наземных, авиационных и спутниковых измерений, затрагивает различные области оптики и физики атмосферы. Ввиду своей сложности, задача классификации хвойных древостоев может решаться при помощи самых разных аппаратных и программных средств.

Цель данной работы состояла в разработке и реализации мультиканального спектрального сенсора для специфической задачи регистрации спектров отдельных деревьев с авиационной платформы, а также проведение летных измерений.

В данной работе представлен вариант исполнения мультиканального спектрального сенсора, который был успешно использован для автоматической регистрации фото-спектральных данных с использованием самолета Diamond DA40NG.

Мультиканальный спектральный сенсор МКСС-1 (рисунок 1) представляет собой совокупность смонтированных на жестком основании сенсоров, для которых осуществлена однозначная привязка по полям зрения, что позволяет поставить в соответствие регистрируемые изображения и данные спектрометра, а также определить угловые параметры каждого сенсора.

Специально разработанное программное обеспечение обеспечивает автоматическую регистрацию и сохранение данных, их синхронизацию и геопривязку.

Синхронизация МКСС-1 осуществляется следующим образом: управляющий сигнал, сгенерированный при помощи программного обеспечения, подается на контроллер детектора спектрометра ФСП-02 [1], в течение нескольких десятков миллисекунд производится регистрация спектра, после чего формируется управляющий сигнал для срабатывания электронного затвора камеры повышенного разрешения на базе детектора Baumer MXUC40 [2]. Чувствительность детектора Baumer такова, что регистрация изобра-

жения занимает от 25 до 100 микросекунд, таким образом, регистрируемое изображение имеет минимальные значения смаза, обусловленного движением авиационной платформы.

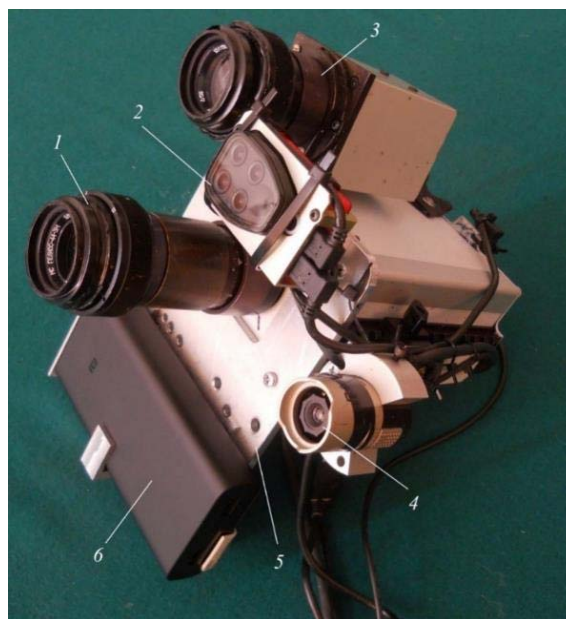


Рисунок 1 – Мультиканальный спектральный сенсор МКСС-1:

1 – ФСП-02; 2 – мультizonальная камера Parrot Sequoia; 3 – камера на основе Baumer MXUC40; 4 – обзорная RGB камера; 5 – кронштейн; 6 – аккумулятор

В состав МКСС-1 входит обзорная RGB камера с полем зрения 30×40 , спектрометр ФСП-02 со спектральным разрешением 4,3 нм на диапазон 400–900 нм и полем зрения $1,5 \times 0,5$, черно-белая камера повышенного разрешения Baumer с разрешением 2048×2048 пикселей и мультizonальная камера Parrot Sequoia [3] имеющая следующие спектральные каналы: $550 \text{ нм} \pm 20 \text{ нм}$; $790 \text{ нм} \pm 20 \text{ нм}$; $660 \text{ нм} \pm 20 \text{ нм}$; $735 \text{ нм} \pm 5 \text{ нм}$.

На рисунке 2 представлен вид МКСС-1, подготовленного для проведения измерений в надириной геометрии наблюдений.



Рисунок 2 – Прибор МКСС-1, подготовленный для проведения авиасъемки с борта самолета Diamond DA40NG

За один час полета прибором МКСС-1, установленном на платформе самолета Diamond DA40NG, было получено 5 463 изображения подстилающей поверхности при помощи камеры Baumer, 13 090 изображений подстилающей поверхности при помощи обзорной RGB камеры, 5 469 спектров подстилающей поверхности в диапазоне 400–900 нм и 7 204 мультиспектральные фотографии при помощи камеры Parrot Sequioia.

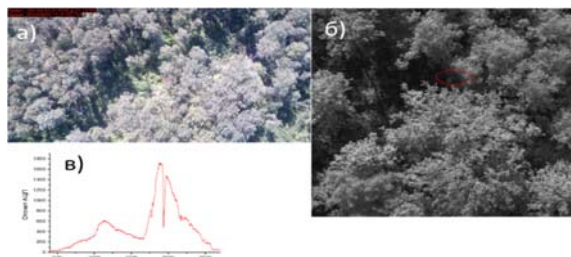


Рисунок 3 – Фото-спектральные данные, получаемые при помощи прибора МКСС-1:

a – изображение обзорной камеры; *б* – изображение черно-белой камеры с повышенным разрешением; *в* – спектр, полученный из области, очерченной красным

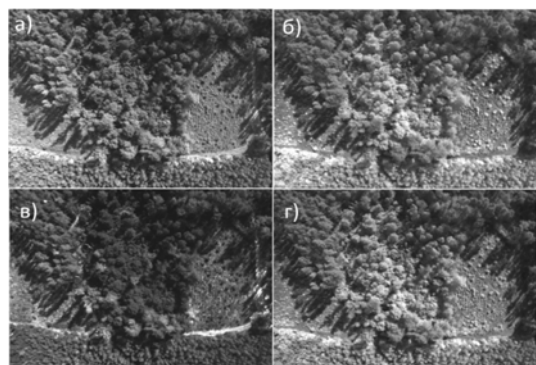


Рисунок 4 – Пример изображений, получаемых с мультиспектральной камеры Parrot Sequioia, входящей в состав прибора МКСС-1:

a – 550 нм ± 20 нм; *б* – 790 нм ± 20 нм; *в* – 660 нм ± 20 нм; *г* – 735 нм ± 5 нм;

На рисунках 3 и 4 представлены пример многоканальных фото-спектральных данных, получаемых при помощи МКСС-1.

Спектральные данные, привязанные к зарегистрированным изображениям, использовались в качестве исходных данных для создания классификатора, при помощи которого осуществлялось разделение исследуемых хвойных древостоев на три класса: здоровые, под воздействием стресса и усохшие. На основании изображений мультиспектральной камеры, с учетом спектральной характеристики отдельных каналов производился поиск характеристических индексов, которые успешно использовались для решения задачи классификации хвойных древостоев.

Разработанный мультисканальный спектральный сенсор МКСС-1 показал относительно устойчивую работу в условиях полета. При этом стоит отметить направления для будущей модернизации с целью повышения качества получаемых данных:

1. Замена черно-белой камеры на цветную более высокого разрешения (> 4 Мп).
2. Интегрирование в систему специально подобранных светофильтров, с учетом особенностей исследуемого объекта.
3. Дополнение системы инклинометрами с целью контроля геометрии визирования.

Литература

1. Станчик В.В., Хомицевич А.Д. Фотоспектрорадиометр для полевых измерений спектров отражения объектов // Материалы IV межд. науч.-практ. конф. «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния». – Минск, 2017. – С. 145–147.
2. Baumer [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.baumer.com/de/en/product-overview/industrial-cameras-image-processing/industrial-cameras/mx-series/c/14050>. – Date of access: 08.10.2020.
3. Parrot Sequioia [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.parrot.com/en/shop/accessories-spare-parts/other-drones/sequoia>. – Date of access: 08.10.2020.

УДК 535.8 + 621.382

ПИКОСЕКУНДНЫЕ ДИОДНЫЕ ЛАЗЕРЫ ДЛЯ ФЛУОРОМЕТРИИ

Воропай Е.С.¹, Ермалицкая К.Ф.¹, Ермалицкий Ф.А.¹, Луценко Е.В.², Радько А.Е.³, Ржеуцкий Н.В.², Самцов М.П.³

¹Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

²Институт физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

³Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ
Минск, Республика Беларусь

Импульсные источники света с короткой длительностью импульса применяются в различных областях науки и технологий. Одной из важных таких областей является кинетическая спектрофлуориметрия, широко используемая при изуче-

нии сложных молекулярных систем. Основываясь на достоверных сведениях об этих параметрах, а также характере их зависимости от различных влияющих факторов, можно получать обширную информацию о структуре и свойствах

как природных, так и синтетических образований. До недавнего времени в ряде спектрофлуориметров использовались газоразрядные импульсные лампы длительностью импульсов по полувысоте около 1 нс и рабочими частотами порядка 20–30 кГц. Существенным недостатком данных ламп является использование высоковольтного питающего напряжения 3–5 кВ.

Повсеместный переход от газоразрядных приборов к полупроводниковым происходит и в спектрофлуориметрии. К тому же частоты следования импульсов диодных лазеров лежат в диапазоне десятков мегагерц, что позволяет резко уменьшить время накопления кривых затухания, а также повысить статистическую точность измерений параметров высвечивания за счет большего числа отсчетов.

Следует отметить, что пикосекундные диодные лазеры могут быть использованы не только во флуориметрии но и в других областях импульсной спектрометрии и дальнометрии – в качестве зондирующих излучателей.

Основными достоинствами данных источников света являются компактность, малая потребляемая мощность и высокая частота следования импульсов. Излучателями в данных лазерах могут служить доступные и недорогие серийные лазерные диоды фирм SONY, SONYO, FUJI, SHARP, которые штатно используются при постоянной накачке или в режиме импульсной или гармонической модуляции. Самое распространенное применение данных лазерных диодов – оптические носители информации, запись на которых производится диодными лазерами синевioletового диапазона – стандарт Blu-Ray (в отличие от инфракрасных лазеров в случае DVD) Цена же специализированных пикосекундных диодных лазеров, предлагаемых ведущими мировыми производителями AlphaLas, PicoQuant, PicoLas, PiLas, Hariba, достаточно высока – превышает 10 000 Евро [1, 2].

Разработанные нами диодные лазеры состоят из блока оптического излучателя и внешнего блока питания (рисунок 1).



Рисунок 1 – Внешний вид диодных лазеров в различных металлических корпусах

Приборы достаточно компактны и технологичны из-за низких уровней питания (12 В) и

потребляемой мощности (3 Вт). Высокая частота следования импульсов – до 80 МГц – позволяет сократить время измерений, что особенно актуально для таких новых медико-биологических применений как FLIM-методы [3].

Блок оптического излучателя лазера включает в себя задающий кварцевый генератор на базе микроконтроллера, цепь синхронизации, низковольтный формирователь субнаносекундных электрических импульсов, цепь накачки диодов на базе подстраиваемого источника постоянного тока и светоизлучатель – лазерный диод. Предусмотрена возможность термостабилизации выходного каскада цепи накачки и лазерного диода. Данный блок может также использоваться для накачки более медленных суб- и наносекундных светодиодов [4].

Задающий кварцевый генератор с базовой частотой 40 (или 80) МГц управляется микроконтроллером, который обеспечивает ступенчато регулируемые кварцованные частоты следования сигналов в диапазоне 0–40 МГц. Наличие многочастотного режима позволяет в случае флуориметрии легко сочетать измерительные режимы прямой и обращенной шкал.

Специальная цепь формирует импульсы синхронизации для используемых устройств регистрации. Она дает возможность при необходимости вводить дополнительную задержку светового сигнала относительно импульса синхронизации. Цепь синхронизации позволяет работать с внешними управляющими сигналами с частотой до 10 МГц.

Низковольтный формирователь вырабатывает наносекундный перепад напряжения около 12 В, который цепью дифференцирования преобразуется в импульс напряжения длительностью менее 1 нс. После инвертирования данный импульс через эмиттерный повторитель поступает непосредственно на лазерный диод. Для оптимизации режима работы лазерных диодов имеется регулируемый источник постоянного тока.

Задание параметров излучаемых световых импульсов – длительности и световой мощности – для каждого диода обеспечивается подбором тока накачки и напряжения смещения. Реализация режима генерации одиночных импульсов достигается для лазерных диодов в надпороговом режиме. При достаточном превышении порога генерации эмиттируются цуги импульсов, которые при дальнейшем увеличении тока накачки сливаются в широкий моноимпульс длительностью 1–1,2 нс. Для каждого типа лазерных диодов порог генерации достаточно индивидуален и поэтому исследователям для каждой длины волны необходимо иметь свой диодный лазер. Применение низковольтного 12-вольтового формирователя субнаносекундных электрических импульсов, как и в работе [4], позволяет избежать тех-

нологических неудобств высоковольтных 120–200 В формирователей на лавинных транзисторах [5, 6]. Это особенно важно для приборов, предназначенных для работы в полевых условиях.

Наружный сетевой блок-адаптер 220 В/12 В × 0,25 А (обычно, промышленного производства) обеспечивает излучатель необходимым напряжением питания 12 В.

Технические характеристики реализованных пикосекундных диодных лазеров: На базе серийных лазерных диодов фирм Sony и Fuji были созданы диодные лазеры с длинами волн излучения от 405 до 808 нм.

В режиме генерации пикосекундных импульсов реализованы следующие длительности лазерных импульсов на полувысоте для ряда длин волн: 405 нм – 70 пс (рисунок 2); 520 нм – 130 пс; 650 нм – 90 пс; 780 нм – 180 пс.

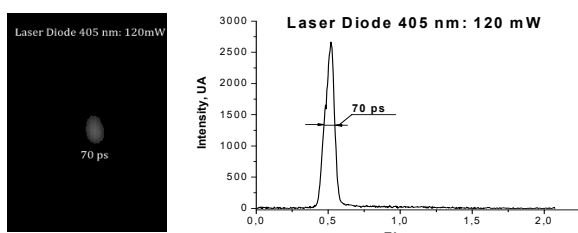


Рисунок 2 – Временной профиль излучения диодного лазера на базе лазерного диода Sony SLD 3236VF (длина волны 405 нм и номинальная паспортная мощность 120 мВт). измеренный стрик-камерой Hamamatsu C 4334

Длительность же излучаемых импульсов в режиме наносекундной генерации составляет 1–1,2 нс для всех использованных типов лазер-

ных диодов. Для временных измерений использовались как скоростная щелевая камера Hamamatsu C 4 334 (разрешение 25 пс), так и спектрометры времякоррелированного счета фотонов (разрешение 80 пс).

Достижимая средняя световая мощность – до 10 мВт.

Частоты следования световых импульсов: при внутреннем запуске 0–40 МГц; при внешнем – до 10 МГц.

Типичные размеры диодного лазера – 115×64×30 мм и 89×35×30 мм при габаритах электронной платы 60×30×20 мм.

Питание от серийного блока питания – 220 В/12 В × 0,25 А, потребляемая мощность 3 Вт. Масса 0.2 кг.

Литература

1. www.picoquant.de.
2. www.alphalas.de.
3. Беккер В., Желзов А., Чеславский В. Визуализация времени жизни флуоресценции с помощью многомерного TCSPC-метода: новые возможности в биомедицине. – Фотоника, 2015. – Т. 53, № 5. – С. 52–66.
4. Воробей Е.С., Ермалицкий Ф.А., Радько А.Е., Самцов М.П. Суб- и наносекундные диодные источники света. – Приборы и техника эксперимента, 2020. – № 1. – С. 151–152.
5. Uhring W., Zint C-V., Bartinger J. A low cost high repetition rate picosecond laser diode pulse generator. – Proc. SPIE, 2004, 5454, September, DOI 10.1117/12.545038, p. 583–590.
6. Binh P.H., Trong V.D., Renucci P., Marie X. A simple sub-nanosecond ultraviolet pulse generator with high repetition rate and peak power. – Rev.Sci.Instrum., 2013, v. 84, N 083102, p. 1.

УДК 577.345:615.831

КОЛЛИМИРУЮЩАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО МОДУЛЯ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 405 НМ

Вяжевич Г.И.^{1,2}, Фёдорцев Р.В.¹, Соснина Л.А.^{1,2}

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²УП «Научно-технический центр ЛЭМТ», БелОМО
Минск, Республика Беларусь

В данной работе представлены результаты проектирования зеркальной коллимирующей системы для лазерного модуля с длиной волны 405 нм, который предназначен для установки медицинский прибор терапевтического профиля, предназначенный для лечения (регенерации) внешних тканей растительного и животного происхождения. Представлено обоснование выбора составных компонентов и осуществлена общая компоновка изделия.

Прибор, в котором планируется использование лазерного модуля, портативный и предполагает ручное использование. В связи с этим применение

зеркальной коллимирующей системы в данной конструкции обусловлено рядом факторов:

- использование единственного оптического элемента для одновременного перенаправления и коллимации лазерного излучения;
- снижение массы и габаритных размеров прибора;
- эффективное распределение лазерного излучения по рабочей поверхности зеркала и отвод тепла;
- относительно малые потери по мощности лазерного излучения по сравнению с линзовыми системами [1];

– отсутствие присущих линзовым системам aberrаций;

– равномерное распределение интенсивности лазерного излучения по обрабатываемой поверхности.

Вариант общей компоновки прибора представлен на рисунке 1.

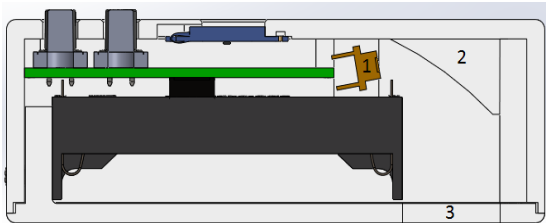


Рисунок 1 – 3D модель прибора (осевой разрез)

Как видно из рисунка, излучение от лазерного диода 1 поступает на зеркало 2, которое одновременно перенаправляет ход лучей в отверстие крышки (выходное окно 3) и в то же время обеспечивает необходимый размер пятна в рабочей области объекта.

Такая конфигурация излучателя обусловлена ограничениями во внутреннем пространстве корпуса прибора, а также позволяет использовать в оптической системе только одно зеркало, что снижает общую массу прибора и потери при контакте излучения с рабочей плоскостью оптической системы.

Для расчёта параметров зеркала необходимы следующие входные данные:

- размер излучающей зоны лазерного модуля;
- базовая расходимость излучения лазерного модуля;
- длина волны лазерного излучения;
- максимальная мощность лазерного излучения.

В качестве источника излучения был выбран лазерный диод модели SLD3134VR-31 мощностью 20 мВт и с пороговым током 26 мА (рисунок 2).

В качестве источника (точки) излучения служит выходное окно emitting point, диаметром 1,6 мм. Рабочая область модуля защищена от внешней среды стеклянной пластиной толщиной 0,25 мм, которая имеет просветляющее покрытие. Поэтому потерями на выходном окне модуля можно пренебречь.

Далее необходимо измерить угол расходимости лазерного излучения. Это необходимо для определения рабочей области коллимирующего зеркала для наиболее эффективного использования оптического излучения. В данной конструкции расчёт ведётся для линейного расстояния $35 \pm 0,5$ мм от излучающей зоны до рабочей поверхности зеркала.

Так как параметр угла расходимости не является критически важным в данной конструкции и

может быть скорректирован впоследствии путем перемещения зеркала в пределах 1 мм, то для построения графика рассеивания излучения в зависимости от расстояния, был собран простейший испытательный стенд, схема которого изображена на рисунке 3.

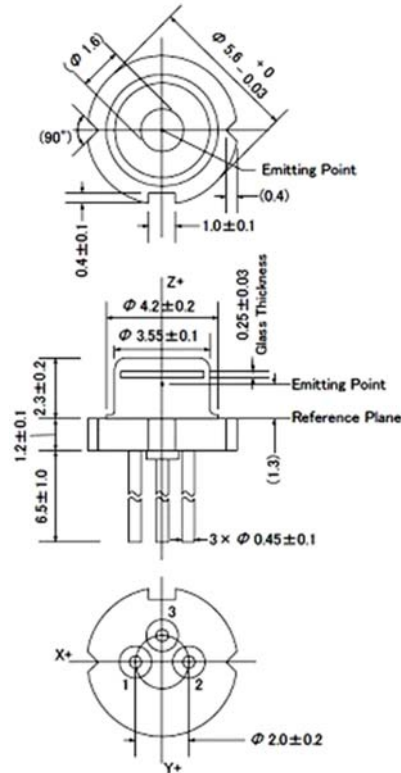


Рисунок 2 – Внешний вид и геометрические параметры лазерного диода

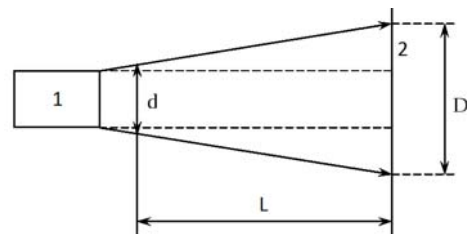


Рисунок 3 – Схема стенда для контроля расходимости лазерного излучения

Методика проведения измерения следующая: контролируемый лазерный диод фиксируется в оправке 1, затем на расстоянии в 5 мм от него располагается стойка с установленной на ней миллиметровой шкалой 2, которая обращена белой стороной к лазерному модулю, а измерительной стороной к наблюдателю. Мощность излучения лазера выставляется 20 %. С измерительной стороны миллиметровой бумаги фиксируется размер пятна с максимальной интенсивностью. Далее экран перемещается с шагом 5 мм до целевой величины линейного расстояния. Для снижения погрешности на каждом этапе измерений вычисляется угол расходимости, а результа-

том измерений является среднее арифметическое от углов расходимости $\tau_{\text{ср}}$. Угол расходимости может быть вычислен по следующей формуле:

$$\tau = 2 \left(\tan^{-1} \frac{D - d}{2L} \right),$$

где L – расстояние от плоскости экрана до плоскости излучателя, мм; D – диаметр сечения лазерного пучка на поверхности экрана, мм; d – диаметр сечения лазерного пучка на выходном окне лазерного диода, мм; τ – угол расходимости лазерного излучения, градусов.

Диаметр сечения лазерного пучка на выходном окне примем за размер диафрагмы лазерного диода (1,2 мм). Таким образом, получены значения расходимости лазерного излучения (таблица 1).

Длина волны и максимальная мощность излучения лазерного модуля приведены в его документации и равны соответственно 405 нм и 50 мВт.

Для изготовления зеркала необходимо выбрать материал с максимальным коэффициентом отражения в рабочей области спектра излучения.

Из таблицы 1 [2] следует, что наибольшим коэффициентом отражения R в УФ области спектра, а именно в диапазоне длин волн $\lambda = 380\text{--}436$ нм обладает алюминий. Таким образом, для снижения массы и повышения качества рабочей поверхности, следует изготавливать зеркало путём напыления его в вакууме на стеклянную подложку с заранее сформированным радиусом кривизны.

Таблица 1

Расстояние L , мм	5	10	15	20	25	30	35	$\tau_{\text{ср}}$
Диаметр диафрагмы d , мм	1,2							
Диаметр пучка D , мм	10,5	19	27	35	44	53	61	
Угол расходимости τ , гр	81	83	82	81	81	82	81	81,6

По полученным данным проведено моделирование и вычисления оптической системы в программном пакете ZEMAX. Исходные параметры представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры для моделирования оптической системы в программе ZEMAX

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	1.000000		0.000000
1	Standard		Infinity	0.000000		0.600861
2	Coord Break			8.000000	-	0.000000
STO	Standard		-80.000000	-50.000000	MIRROR	20.475269
IMA	Standard		Infinity			66.734629

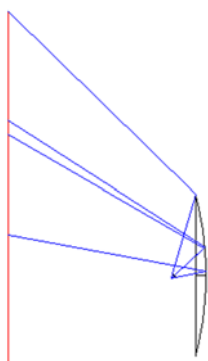


Рисунок 4 – Схема хода лучей

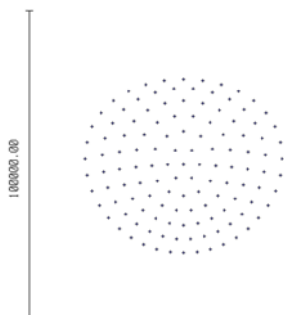


Рисунок 5 – График пятна рассеивания

На рисунке 4 представлен ход лучей в зеркальной оптической системе.

Получен график пятна рассеивания (рисунок 5) лазерного пучка на рабочем расстоянии в 50 мм.

В результате расчёта получены следующие необходимые параметры для изготовления зеркала:

- радиус кривизны поверхности – $80 \pm 0,1$ мм;
- радиус рабочей поверхности зеркала 21 ± 1 мм;
- материал стекла из которого изготавливается подложка зеркала БК7;
- материал отражающей поверхности алюминий;

Таким образом, было установлено, что в рабочей зоне излучателя на расстоянии 50 мм максимальная ширина пучка лазера равна 56 ± 1 мм, а потери при отражении составляют не более 3 % [2].

Литература

1. Павлов А.В. Оптико-электронные приборы. – Москва: Машиностроение, 1974. – 124 с.
2. Губанова Л.А. Оптические покрытия. – Санкт-Петербург, 2003. – 18 с.

УДК 621.372.821.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРИСТАЛЛА Ho:KYW ПРИ РЕЗОНАНСНОЙ НАКАЧКЕ В ОБЛАСТИ 1.96 МКМ

Дернович О.П.¹, Гусакова Н.В.¹, Кисель В.Э.¹, Павлюк А.А.², Кулешов Н.В.¹¹НИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ

Минск, Республика Беларусь

²Институт неорганической химии имени А.В. Николаева, Сибирское отделение РАН

Новосибирск, Российская Федерация

Лазерные источники, излучающие в области 2 мкм широко востребованы для ряда прикладных применений. Поскольку излучение 2 мкм сильно поглощается водой, лазеры данного спектрального диапазона применяются в медицине, в частности хирургии мягких и твердых тканей. Кроме того, излучение 2 мкм диапазона используется для накачки нелинейных кристаллов. Слабое поглощение излучения атмосферой и безопасность для глаз, делают возможным использование 2 мкм лазеров в системах дистанционного зондирования атмосферы (LIDAR), оптической связи, экологического мониторинга окружающей среды. [1].

С целью получения генерации в спектральном диапазоне 2–2,1 мкм используют кристаллы активированные ионами гольмия. Достоинствами данных лазерных сред по сравнению с кристаллами активированными ионами тулия, являются высокие сечения стимулированного испускания в указанном спектральном диапазоне и сравнительно большое время жизни верхнего лазерного уровня 5I_7 . Кроме того, резонансная накачка на верхний лазерный уровень 5I_7 позволяет снизить тепловыделение в активной среде и получать более высокие эффективности генерации.

Интерес к кристаллам вольфраматов обусловлен возможностью роста кристаллов с высокими концентрациями ионов активаторов. В связи с этим, одним из актуальных вопросов на сегодняшний день остается оптимизация концентрации ионов гольмия в данных матрицах с целью получения максимальной эффективности генерации. Спектроскопические характеристики кристалла Ho:KYW представлены в работе [2]. В настоящей работе исследуются генерационные характеристики кристаллов Ho:KYW с различным содержанием ионов гольмия при накачке в области 1,96 мкм.

Схема резонансной накачки кристалла Ho:KYW представлена на рисунке 1. В качестве источника накачки использовался перестраиваемый тулиевый лазер на основе кристалла Tm(6,2 ат.%):KLuW. Перестройка длины волны лазера осуществлялась с помощью двулучепреломляющего фильтра (P). Излучение тулиевого лазера фокусировалось в активный элемент при помощи одиночной линзы с фокусным расстоянием 40 мм. Диаметр пятна накачки в кристалле составлял 60 мкм.

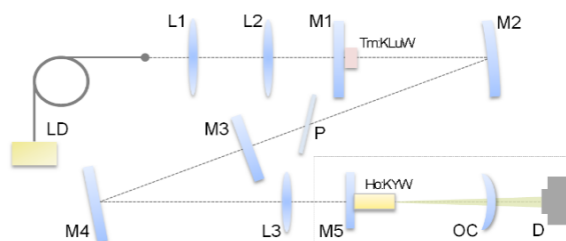
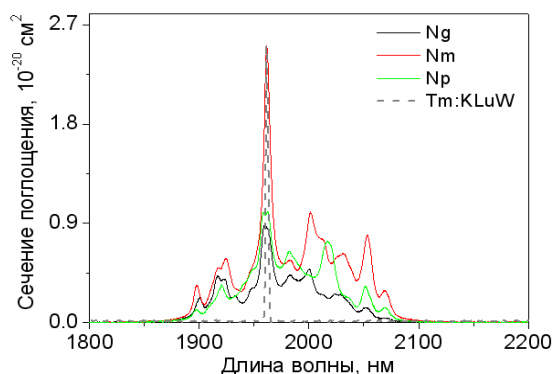


Рисунок 1 – Схема резонансной накачки кристалла Ho:KYW

Спектры поглощения кристалла Ho:KYW, зарегистрированные в поляризованном свете использовались для уточнения концентрации ионов гольмия в исследуемых образцах и согласования длины волны генерации тулиевого лазера с полосой поглощения ионов гольмия $^5I_8 \rightarrow ^5I_7$. Спектры сечений поглощения кристалла Ho:KYW представлены на рисунке 2.

Рисунок 2 – Спектры сечений поглощения кристалла Ho:KYW, соответствующие переходу $^5I_8 \rightarrow ^5I_7$

Максимум в спектре сечений поглощения находится соответствует длине волны 1 961,5 нм ($E//Nm$), ширина линии поглощения на полувысоте составляет 8,6 нм. На рисунке 2 так же представлен спектр генерации тулиевого лазера. Ширина спектра генерации тулиевого лазера на полувысоте составляет 2,8 нм.

Активные элементы Ho (1 ат.%):KYW и Ho (3 ат.%):KYW вырезанные вдоль оси оптической индикатрисы Ng длиной 11 мм и 5 мм, соответственно, устанавливались на медном теплоотводе. На входную и выходную грани активных элементов были нанесены антиотражающие покрытия для длин волн накачки и лазерной гене-

рации. Для экспериментов был выбран полусферический резонатор (радиус кривизны выходного зеркала – 30 мм). Пропускание выходного зеркала составляло 1 %.

На рисунке 3 представлены зависимости выходной мощности лазеров на основе кристаллов Ho:KYW

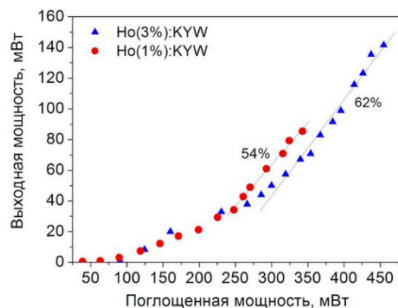


Рисунок 3 – Зависимость выходной мощности Ho(1 ат.%):KYW и Ho(3 ат.%):KYW лазеров, работающих в непрерывном режиме генерации от поглощенной мощности накачки

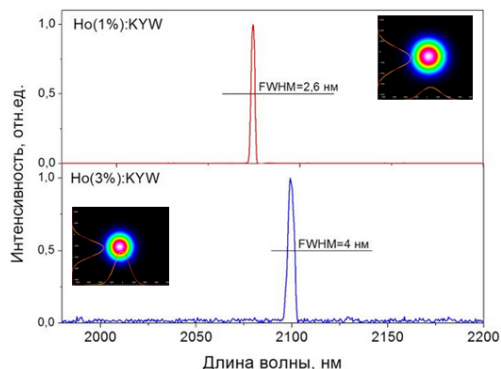


Рисунок 4 – Спектры генерации лазеров на основе кристаллов Ho(1 ат.%):KYW и Ho(3 ат.%):KYW

Максимальная выходная мощность лазеров на основе кристаллов Ho(1 ат.%):KYW и Ho(3 ат.%):KYW составляла 85 мВт и 141 мВт, и ограничивалась максимальной мощностью источника накачки. Дифференциальная эффективность по отношению к падающей мощности накачки составляла 37 % для кристалла Ho(1 ат. %):KYW и 58 % и для кристалла Ho(3 ат.%):KYW. По отношению к поглощенной мощности накачки 54 % и 62 %, соответственно. С ростом концентрации ионов гольмия, наблюдалось увеличение порога генерации от 63 мВт до 90 мВт по поглощенной мощности накачки. Что может быть обусловлено более высокими ап-конверсионными потерями для кристалла Ho(3 ат. %):KYW. В обоих случаях излучение генерации было поляризовано вдоль оси оптической индикатрисы Nm и лазеры работали в режиме генерации TEM₀₀ моды. Спектры генерации представлены на рисунке 4.

Максимум в спектре генерации Ho(1 ат.%):KYW лазера соответствовал длине волны 2074 нм, для кристалла Ho(3 ат.%):KYW – 2099 нм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (код проекта Ф19М-075).

Литература

1. K. Scholle, S. Lamrini, P. Kookmann and P. Fuhrberg, 2 μ laser sources and their possible applications (Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics B Pal. Ed., InTech, Rijeca, Croatia, 2010)
2. V. Jambunathan, X. Mateos, P.A. Loiko, J.M. Serres, U. Griebner, V. Petrov, K.V. Yumashev, M. Aguilo, F. Diaz, "Growth, spectroscopy and laser operation of Ho:KY(WO₄)₂", J. of Lum, 2016, 179. Pp. 50–58.

УДК 528.8.042

МАКЕТ ЛАЗЕРНОГО ЛОКАТОРА МАЛОГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТРИЧНОГО ФОТОПРИЁМНИКА

Гусаров И.Е.¹, Алексеев Н.И.¹, Калугин А.И.², Антонов Е.А.², Зарипов М.Р.²

¹ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашикова»
Ижевск, Российская Федерация

²Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН
Ижевск, Российская Федерация

Введение. Лазерная локация представляет собой совокупность методов обнаружения, измерения угловых и пространственных координат, а также распознавания формы удалённых объектов с помощью лазерного излучения. Лазерный локатор облучает объект с помощью излучателя и принимает отражённое от цели излучение при помощи фотоприёмной системы. Фотоприёмная система преобразует оптический сигнал в электрический. Полученный таким образом электрический сигнал содержит информацию о параметрах лоцируемого объекта. Задачей лазерной ло-

кации является в том числе расшифровка такого сигнала, определение координат объекта и его типа.

В данный момент существует проблема, связанная с невозможностью обнаружения и распознавания объектов малого размера. Современные локационные системы в подавляющем большинстве в качестве зондирующего сигнала используют радиоволны, что, в свою очередь, накладывает ограничения на минимальный размер распознаваемого объекта [1]. Что касается лазерных локаторов, то они также не лишены недостатков.

Принцип работы такого типа локаторов заключается в последовательной регистрации оптических сигналов из некоторого зондируемого участка, который может обеспечить параметры фотоприёмника. Стоит отметить, что размеры зондируемой области могут намного превышать поле зрения фотоприёмного элемента, что, в свою очередь, потребует передвижения локатора или же применения сложной приёмной оптической системы для достижения необходимого размера кадра. Вторым недостатком является скорость сканирования пространства, так как фотоприёмный элемент, в данном случае, участвует в определении как угловых координат объекта, так и расстояния до него. Под этим подразумевается невозможность приёма и расшифровки следующего сигнала до момента пока не получена информация от предыдущего.

Описание разработанного макета лазерного локатора. Описанные выше недостатки будут решены использованием матричного фотоприёмника [2], который будет выполнять функцию быстрого построения изображения сканируемой области для дальнейшего обнаружения и распознавания объекта, и отдельного дальномерного модуля.

Классический лазерный локатор состоит из четырёх подсистем [3, 4]: блока излучателя, приёмного блока, блока управления и сканирующей системы. Кроме того, в состав локатора может быть добавлена система слежения за объектом.

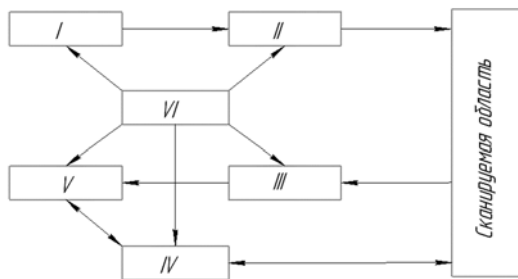


Рисунок 1 – Структурная схема макета лазерной локаторной системы:

I – Блок излучателя, *II* – Блок сканирования, *III* – Блок приёмной системы, *IV* – Блок слежения, *V* – Блок управления и анализа, *VI* – Общий блок питания

Разработанный макет лазерного локатора состоит из шести подсистем (рисунок 1): блок излучателя, блок сканирования, блок приёмной системы, блок слежения, блок управления и анализа, общий блок питания. Задачей блока излучателя является формирование импульсов лазерного излучения с требуемой мощностью, длительностью и частотой. Далее сканирующий блок формирует и посылает лазерный пучок в определенном направлении с заданными азимутальным и зенитным углами. Отраженный от объектов, находящихся на пути пучка, оптиче-

ский сигнал поступает в блок приёмной системы, который преобразует его в электрический сигнал и передает в блок управления и анализа. Блок управления и анализа осуществляет контроль и управление всеми блоками локаторной системы, а также выделяет полезный сигнал, производит его анализ и расшифровку, определяет цель, за которой требуется слежение. Блок слежения выполняет наблюдение за заданным объектом, при этом измеряет расстояние до него и скорость его движения.

На рисунке 2 приведён внешний вид разработанного макета лазерного локатора, в составе которого блок приёмной системы и блок управления и анализа объединены и представлены в виде блока обнаружения и распознавания.



Рисунок 2 – Общий вид разработанного макета лазерного локатора

Подробнее остановимся на оптической системе блока сканирования (рисунок 3). Данный блок включает в себя следующие оптические элементы: полигональное зеркало, качающееся и неподвижное зеркала [5]. Принцип действия данной оптической передающей системы прост: вращающееся полигональное зеркало обеспечивает перемещение лазерного пучка в горизонтальной плоскости сканируемой области, а качающееся зеркало, в свою очередь, изменяет координаты пучка в плоскости кадра в вертикальном направлении. Неподвижное зеркало необходимо для транспортировки излучения от полигонального зеркала до качающегося зеркала. Компоновка передающего блока разработанного макета лазерного локатора приведена на рисунке 3.

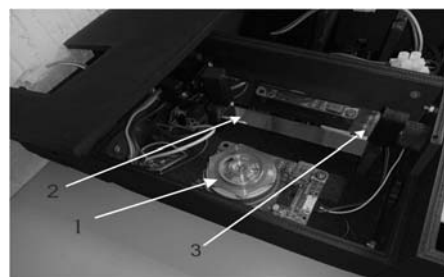


Рисунок 3 – Компоновка оптических элементов в блоке передающей системы:

1 – полигональное зеркало; *2* – неподвижное зеркало; *3* – качающееся зеркало

Рассмотрим алгоритм работы описываемого макета лазерного локатора. После включения устройства кнопкой питания блок управления и анализа начинает загрузку операционной системы и запускает рабочую программу. В это время на контроллерах передающего блока и блока слежения запускаются подпрограммы работы блоков, а блок излучателя включает лазер. После запуска и теста матричного фотоприёмника, блок управления и анализа даёт команду на старт работы блока сканирования и дальномера. В итоге, блок управления начинает цикл сканирования пространства и посылает информацию о координатах отслеживаемого объекта на элемент управления блока слежения, который, в свою очередь, координирует положение приемопередающей апертуры дальномера посредством поворота сервоприводов и отправляет данные о дальности до объекта обратно на блок управления и анализа.

Выводы. Разработанный макет лазерного локатора позволяет производить сканирование пространства и обнаружение объекта малого размера с последующим слежением за ним. В конструкцию локатора, как было сказано ранее, в отличие от классических схем, был внесён блок слежения. Макет локатора может использоваться как самостоятельная установка или элемент более крупной системы для обнаружения и слежения за малыми

объектами, а также для отработки различных программных алгоритмов сканирования.

Работа выполнена в рамках темы НИР Удм-ФИЦ УрО РАН «Искусственный интеллект в разработке, обучении и сопровождении экспертных систем представления и использования знаний в естественно-научных, технических и социогуманитарных направлениях» АААА-А19-119092690104-4.

Литература

1. Калугин А.И., Зарипов М.Р., Антонов Е.А. Лазерная локационная система обнаружения и распознавания малоразмерных объектов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18, № 1. – С. 9–14.
2. Грязнов Н.А., Панталеев С.М., Иванов А.Е., Кочкарев Д.А., Куликов Д.С. Высокопроизводительный метод измерений координат объектов в условиях космического пространства // Научно-технические ведомости СПбПУ. – 2013. – Т. 2. – С. 197–202.
3. Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р. Лазерная локация земли и леса: Учебное пособие. – М.: Геолидар, Геокосмос, 2007. – 230 с.
4. Козинцев В.И., Белов М.Л., Орлов В.М. Основы импульсной лазерной локации. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 571 с.
5. Handbook of Optical and Laser Scanning, Second Edition [Книга] / Gerald F. Marshall, Glenn E. Stutz. – Нью-Йорк : Marcel Dekker publishing, 2004. p. 291.

УДК 621.372.821.1

ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В ВОЛНОВОДНОМ РЕЖИМЕ НА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ СЛОЕ ДВОЙНОГО КАЛИЕВОГО ВОЛЬФРАМАТА С ИОНАМИ ГОЛЬМИЯ

Дернович О.П.¹, Гусакова Н.В.¹, Ясюкевич А.С.¹, Кисель В.Э.¹,
Кравцов А.В.², Колесова И.М.², Гурецкий С.А.², Кулешов Н.В.¹

¹НИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ

Минск, Республика Беларусь

²ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению»

Минск, Республика Беларусь

Твердотельные лазеры, в которых распространение излучения в активной среде ограничено в одном или двух направлениях в пределах размеров, сравнимых с длиной волны излучения, называются волноводными. Базовая структура диэлектрического волновода состоит из вытянутой в продольном направлении оптической среды с высоким показателем преломления, которая окружена средой или средами с более низкими показателями преломления, называемыми подложкой и оболочкой. Ограничение и направление излучения в активном слое осуществляется за счет эффекта полного внутреннего отражения.

Волноводные лазеры сочетают в себе преимущества как волоконных, так и объемнокристаллических лазеров. Они характеризуются высокой пространственной согласованностью мод резонатора и накачки, отличаются высокими

коэффициентами усиления, имеют низкий порог генерации вследствие высокой плотности инверсии населенностей при сравнительно низких мощностях возбуждения, и могут использоваться вместе с другими оптическими компонентами в составе современных интегральных оптических систем [1, 2].

Для создания волноводных лазеров активно применяются монокристаллические слои калий-редкоземельных вольфраматов $K\text{Re}(\text{WO}_4)_2$ ($\text{Re}=\text{Y}, \text{Gd}, \text{Lu}$) [3–5]. Активация их ионами гольмия Ho^{3+} позволяет получить лазерную генерацию в спектральной области двух микрометров. Источники этого спектрального диапазона требуются для дистанционного зондирования земли, медицинских применений, обработки материалов, а также используются в качестве источника возбуждения оптических параметрических генераторов [6–8]. Для возбуждения гольмие-

вых сред подходящим является метод резонансной накачки тулиевым лазером, генерирующим в спектральной области около 1,95 мкм. В этом случае наблюдается низкая вероятность апконверсионных процессов и малые стоксовые потери, т. к. длина волны генерации близка к длине волны возбуждения.

В данной работе исследуется монокристаллический слой калиевого вольфрамата сложного состава, легированный трехвалентными ионами гольмия, для применения его в качестве активного элемента волноводного лазера в условиях резонансной лазерной накачки.

Для расчета химического состава монокристаллического слоя $\text{KGd}_x\text{Yb}_y\text{Y}_{(1-x-y)}(\text{WO}_4)_2$, легированного ионами Ho^{3+} , обеспечивающего необходимый контраст показателей преломления и согласование кристаллической структуры слоя и подложки, использовалась разработанная математическая модель, позволяющая рассчитывать параметры кристаллической ячейки и показатель преломления слоя $\text{KGd}_x\text{Yb}_y\text{Y}_{(1-x-y)}(\text{WO}_4)_2$ при различном соотношении ионов Gd^{3+} и Yb^{3+} .

Рост монокристаллического слоя калий-иттриевого вольфрамата, солегированного оптически инертными ионами гадолиния и иттербия (в условиях резонансной накачки) и активным ионом гольмия, производился методом жидкофазной эпитаксии на подложке кристалла $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$, которая имела поперечные размеры 10×10 мм и толщину в направлении кристаллографической оси b 2 мм. Процесс кристаллизации в методе жидкофазной эпитаксии осуществляется за счёт пересыщения раствора-расплава вблизи границы раздела в центральной приповерхностной зоне. Рост производился при температуре $900\text{--}920$ °C и скорости вращения подложки $30\text{--}40$ оборотов в минуту. Раствор-расплав нагревался в тигле выше температур насыщения на $30\text{--}50$ ° и проводилась гомогенизация в течение 12 часов. Далее температура опускалась до температуры на $1,5\text{--}2,5$ °C ниже температуры насыщения и проводился рост плёнки в течение времени сообразно заданной толщины.

Полученный образец был вырезан вдоль осей оптической индикатрисы кристалла N_m и N_g и отполирован до толщины слоя 40 мкм (вдоль кристаллографической оси b , которая совпадает с осью оптической индикатрисы N_p). Фотография торца слоя с увеличением 100 крат, сделанная через микроскоп Полам РП-1 (ЛОМО) с помощью CCD камеры, представлена на рисунке 1. Выращенный слой имел высокое оптическое качество.

Концентрация ионов гольмия, оцененная сравнением спектров поглощения монокристаллического слоя и объёмного кристалла известной концентрации, составила 4,8 ат. %.



Рисунок 1 – Фотография монокристаллического слоя, активированного ионами гольмия, выращенного на кристалле $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$

Для исследования генерационных свойств была собрана экспериментальная установка с резонансной лазерной накачкой (рисунок 2). В качестве источника накачки использовался лазер на основе кристалла $\text{Tm:KLu}(\text{WO}_4)_2$ максимальной мощностью 500 мВт с возможностью перестройки длины волны генерации, что позволило согласовать длину волны генерации с пиком поглощения ионов гольмия на длине волны 1960 нм.

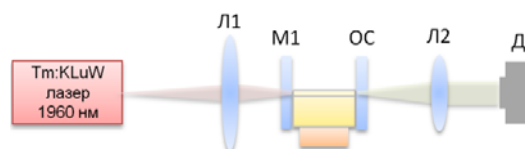


Рисунок 2 – Схема лазерной экспериментальной установки для исследования генерационных характеристик:

$L1$ – фокусирующая линза; $M1$ – входное зеркало; OC – выходное зеркало; $L2$ – коллимирующая линза; D – детектор

Фокусирующая линза с фокусным расстоянием 40 мм обеспечивала радиус перетяжки моды накачки 30 мкм. Распределение излучения накачки на выходном торце волновода приведено на рисунке 3.

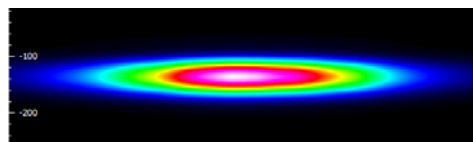


Рисунок 3 – Распространение излучения накачки – увеличенное изображение выходного торца монокристаллического слоя,

Резонатор лазера был образован плоскими зеркалами, которые подводились к торцам образца с зазором меньше 0,5 мм. Входное зеркало $M1$ характеризовалось высоким коэффициентом пропускания на длине волны 1960 нм и высоким коэффициентом отражения для диапазона длин волн свыше 2000 нм. Активный элемент был вырезан вдоль оси оптической индикатрисы N_g длиной 8 мм и помещен на медный теплоотвод без системы активного охлаждения. Излучение накачки было поляризовано параллельно оси оптической индикатрисы активного кристалла N_m .

Лазерная генерация была получена с выходными зеркалами различного пропускания на длине волны генерации: 4 %, 7 %, 14 %. Выходные характеристики лазера представлены на рисунке 4. Длина волны генерации находилась в области 2 055 нм для всех значений пропускания зеркал, ширина спектра на полувысоте $2 \pm 0,1$ нм. Максимальная выходная мощность была достигнута с пропусканием выходного зеркала 7 % и составила 16 мВт. Излучение было поляризовано вдоль оси оптической индикатрисы N_m . Дифференциальная эффективность по падающей мощности накачки составила 18 %. Порог генерации достигался при мощности накачки менее 200 мВт.

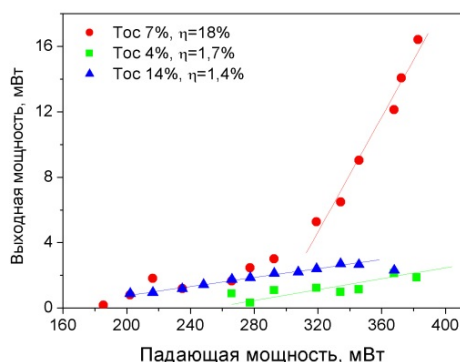


Рисунок 4 – Выходные характеристики лазера на основе монокристаллического слоя $\text{Ho:KGd}_{0,12}\text{Yb}_{0,13}\text{Y}_{0,72}(\text{WO}_4)_2$, выращенного на подложке $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$

Таким образом, на монокристаллическом слое $\text{Ho}(4,8 \text{ ат. \%})\text{:KGd}_{0,12}\text{Yb}_{0,13}\text{Y}_{0,72}(\text{WO}_4)_2$ толщиной 40 мкм, выращенном методом жидкофазной эпитаксии, получена генерация в волноводном режиме при резонансной лазерной накачке.

Литература

1. Grivas C. Optically pumped planar waveguide lasers, Part I: Fundamentals and fabrication techniques / C. Grivas // Progress in Quantum Electronics. – 2011. – Vol. 35. – P. 159–239.
2. J.I. Mackenzie J.I. Dielectric Solid-State Planar Waveguide Lasers: A Review / J.I. Mackenzie // IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics. – 2007. – Vol. 13, No. 3. – P. 626–637.
3. Double Tungstate Lasers: From Bulk Toward On-Chip Integrated Waveguide Devices / M. Pollnau [et.al.] // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. – 2007. – Vol. 13, No. 3. – P. 661–671.
4. Tm:KY(WO₄)₂ waveguide laser / S. Rivier [et.al.] // Optics express. – 2007. – Vol. 15, No. 9. – P. 5885–5892.
5. Yb-doped KY(WO₄)₂ planar waveguide laser / Y.E. Romanyuk [et.al.] // Optics letters. – 2006. – Vol. 31, No. 1. – P. 53–55.
6. Sorokina I.T. Solid-State Mid-Infrared Laser Sources / I.T. Sorokina, K.L. Vodopyanov. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. – P. 558.
7. Godart A. Infrared (2–12 μm) solid-state laser sources: a review / A. Godard // Comptes Rendus Physique. – 2007. – Vol. 8. – P. 1100–1128.
8. Walsh B.M. Review of Tm and Ho Materials; Spectroscopy and Lasers / B. M. Walsh // Laser Physics. – 2009. – Vol. 19, No. 4. – Pp. 855–866.

УДК 528.854

МАКЕТ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВИДЕНИЯ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ СИСТЕМ Ефимова У.А.¹, Шаранова Г.М.¹, Антонов Е.А.², Калугин А.И.², Зарипов М.Р.²

¹Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашиникова
Ижевск, Российская Федерация

²Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН
Ижевск, Российская Федерация

Вопрос обнаружения объектов в режиме реального времени стоит довольно остро. Иногда крайне необходимо своевременно обнаружить утечку газа, нефтепродуктов или ядовитых химических веществ, обледенение линий электропередач, пропавшего человека в лесной чаще, птиц или беспилотные летательные аппараты в зонах взлетно-посадочной полосы аэропорта и др. Одним из наиболее эффективных методов решения данной проблемы является применение мультиспектральных систем видения (МСВ). МСВ работает в разных диапазонах длин волн одновременно, создавая массив изображений [1]. Каждый пиксель такого массива представляет спектральную характеристику отражательной способности объекта. То есть с помощью мультиспектральной съемки можно обнаружить объект, определить его форму, а также материал.

Авторами был разработан и изготовлен макет МСВ, который обеспечивает выполнение съемки на пяти длинах волн: 532, 612, 780, 850 и 940 нм. На рисунке 1 представлена функциональная схема установки, которая имеет несколько блоков: блок светофильтров, приемную систему, блок перемещения, устройство управления, блок питания.

Светофильтры обеспечивают выделение принимаемого от объекта излучения на центральных длинах волн 532, 612, 780, 850, 940 нм и со спектральными диапазонами пропускания 15, 19, 15, 19, 18 нм соответственно.

В состав приемной системы включены камера Raspberry Pi NoIR Camera v2 и контрольный фо-

топриемник. Камера осуществляет регистрацию изображения. С помощью контрольного фотоприемника производится измерение интенсивности излучения, поступающего на камеру через светофильтр.

Задачей блока перемещения является обеспечение смены светофильтров, установленных перед входной апертурой приемной системы.

В качестве устройства управления используется микрокомпьютер Raspberry Pi 3. Он задает угол поворота серводвигателя блока перемещения и устанавливает требуемый светофильтр. Далее производится съемка камерой, данные с которой поступают в блок управления, обрабатываются и сохраняются в файл. Процедура повторяется для каждого светофильтра.

Блок питания обеспечивает подачу рабочего напряжения на серводвигатель и микрокомпьютер.



Рисунок 1 – Функциональная схема макета МСВ

В результате работы макета создается набор файлов с монохромными изображениями, которые подлежат анализу с целью обнаружения и распознавания различных объектов. Примеры полученных изображений представлены на рисунке 2. На рисунке 2, *a* выделены три объекта: 1 – кора дерева, 2 – пластиковый шар (слева – 2а, справа 2б), 3 – листва дерева. Каждый из объектов имеет свой уникальный спектр отражения, поэтому на различных длинах волн интенсивность пикселей у каждого из объектов будет отличаться. Зависимость интенсивности этих объектов от длины волны показана на рисунке 3.

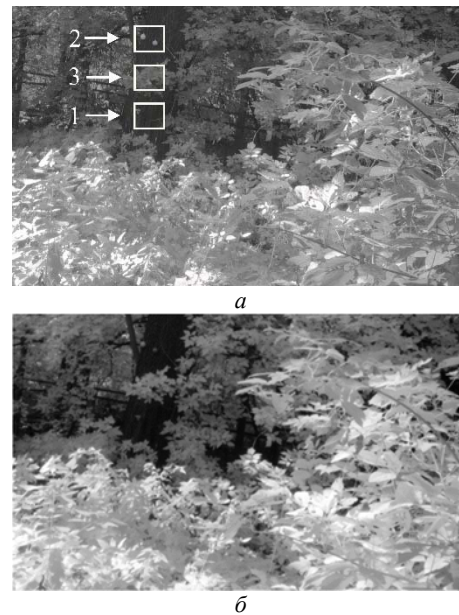


Рисунок 2 – Результаты съемки МСВ на длинах волн 532 (*a*) и 780 (*б*) нм

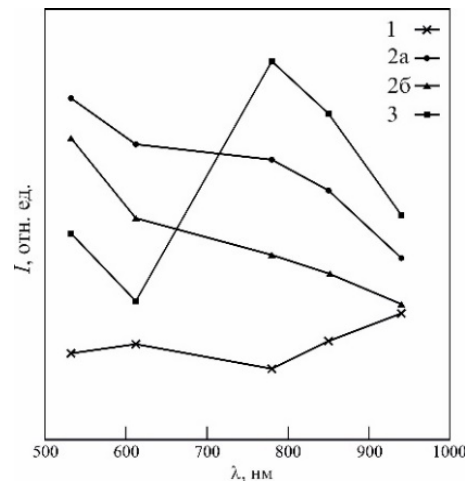


Рисунок 3 – Зависимость интенсивности изображения выделенных объектов от длины волны:

1 – кора дерева; 2а – левый шар; 2б – правый шар; 3 – листва дерева

Таким образом, с помощью мультиспектральной съемки пространственная информация об объекте дополняется спектральной характеристикой объекта. В дальнейшем, полученные изображения объектов анализируются с использованием нейронных сетей, что позволяет не только выделить все возможные объекты на изображении и идентифицировать их, но также выявить ранее не встречавшиеся при съемке материалы. При этом нейросеть оказывается весьма простой по сравнению с традиционными нейросетями распознавания объектов по изображениям.

Данный макет не позволяет производить съемку на всех длинах волн одновременно. В то же время, барабанное расположение светофильтров

на диске позволяет увеличивать их количество без применения дополнительных камер и фотоприемников. Увеличением количества светофильтров можно повысить точность идентификации объектов при мульти-спектральной съемке. Макет позволяет собрать информацию о мультиспектральных изображениях разных объектов, которую можно применить для обучения нейросетей. Основные принципы работы данного макета, а также

внедрение нейронных сетей для анализа мультиспектрального изображения лягут в основу создания авторами быстродействующей системы мультиспектрального видения.

Литература

1. Гиперспектральное дистанционное зондирование в геологическом картировании / под ред. Г.Г. Райкунова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 136 с.

УДК 681.785

ВОЗМОЖНОСТЬ ПОСТРОЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА НА ЗЕРКАЛЬНО-ПРИЗМЕННОЙ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ

Зарипов М.Р.¹, Алексеев В.А.²

¹Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук
Ижевск, Российская Федерация

²Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашикова
Ижевск, Российская Федерация

Увеличение эффективности и расширение области применения автономных лазерных систем специального назначения, в частности, медицинских лазерных установок, лазерных систем связи как беспроводной, так и волоконно-оптической, мобильных систем дистанционного лазерного зондирования подразумевает повышение выходной мощности и выходной энергии импульса лазерного излучения.

Таким образом, возникает проблема повышения выходной мощности лазерных источников без увеличения энергии внешнего источника электропитания, без включения в систему дополнительных источников лазерного излучения или без использования оптических усилителей.

Задача повышения выходной мощности наиболее актуальна для систем, построенных на основе импульсных лазерных источников, пиковая мощность импульса излучения которых определяет такие основные характеристики системы, как степень воздействия лазерного излучения на исследуемый объект и дальность распространения лазерного излучения в различных средах.

К настоящему времени отмеченная задача может быть решена за счет применения методов компрессии лазерных импульсов [1], оптических усилителей [2], а также различных способов некогерентного [3] и когерентного [4] суммирования лазерных пучков. Однако данные схемные решения связаны с необходимостью увеличения числа лазерных источников, повышения энергии от внешнего источника питания, а также с ухудшением массогабаритных характеристик разрабатываемых лазерных изделий, что отрицательно сказывается на их автономности.

Таких недостатков можно избежать за счет применения способов синхронного суммирования лазерных импульсов [5, 6], так как они пред-

полагают использование в составе своих схем одного лазерного источника и не требуют наращивания энергии внешнего питания. Тем не менее, устройства синхронного суммирования лазерных импульсов, описанные в работах [5, 6], выполнены на основе волоконно-оптических линий задержки. Очевидно, что такое построение данных систем приводит к необходимости строгого подбора применяемых в них лазерных источников, длина волны λ которых должна лежать в пределах окон прозрачности кварцевого стекла 0,85, 1,3 и 1,55 мкм волоконных световодов.

Однако применение лазерных источников в системах специального назначения ограничено не только ближним инфракрасным диапазоном. Использование устройств синхронного суммирования лазерных импульсов в подобных системах позволит повысить их быстродействие и эффективность, а также расширить пределы их применения. Таким образом, возникает задача разработки способа, обеспечивающего увеличение выходной мощности лазерных источников в широкой спектральной области оптического диапазона.

Авторами настоящего сообщения для решения поставленной задачи предлагается рассмотреть возможность применения схемы с кольцевой зеркально-призмной линией задержки, которая обеспечивает синхронное суммирование лазерных пучков за счет их полного внутреннего отражения в ней (рисунок 1).

Данная система является модификацией устройства с кольцевой волоконно-оптической линией задержки, предложенного ранее авторами в [6]. Поэтому ее действие также заключается в последовательном наложении импульсов лазерного излучения, поступающих на вход оптической системы, друг на друга синхронно и пространственно. То есть должно обеспечиваться наложение начала импульса, поступившего на

вход системы, на начало импульса, совершившего обход в кольцевой оптической системе, кроме того, лазерный пучок на входе в систему должен быть геометрически идентичен лазерному пучку, совершившему обход в системе. При этом пучок, совершивший обход, накапливает в себе за счет суммирования энергию излучения с каждой циркуляцией в кольцевой линии.

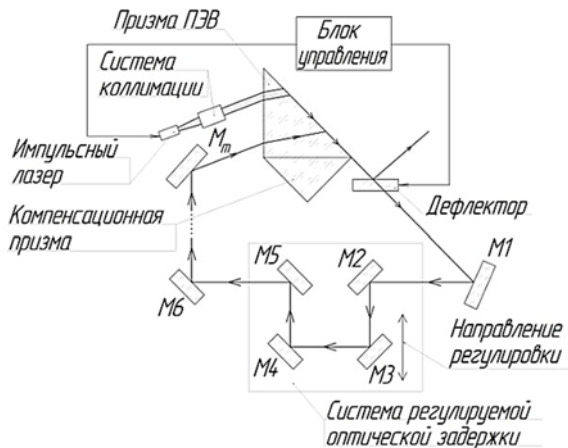


Рисунок 1 – Схема кольцевой зеркально-призменной системы синхронного суммирования и накопления лазерных импульсов

Система на рисунке 1 действует следующим образом. Импульсный лазер формирует пучок оптического излучения с частотой следования импульсов f . Такой исходный пучок каждого лазерного импульса далее проходит через систему коллимации, значительно снижающую его расходимость, что обеспечивает практически постоянную ширину пучка в результате его многократных обходов в рассматриваемом на рисунок 1 устройстве. Затем пучок поступает на входную грань призмы ПВО под таким углом θ , чтобы после преломления на входной грани он мог попасть на противоположную отражающую грань призмы (далее – грань ПВО) под критическим углом полного внутреннего отражения и распространяться вдоль нее. Затем такой пучок ПВО падает нормально на выходную грань компенсационной призмы и выходит из призменной склейки, не меняя таким образом своего направления. Дальнейший обход пучка обеспечивается за счет внешних оптических элементов – системы наклонных зеркал $M1...M_m$, количество m которых определяется требуемым временем оптической задержки, а также требованиями к габаритным размерам оптической системы. При этом последнее зеркало M_m установлено под таким углом, чтобы циркулирующий пучок, совершивший полный обход в кольцевой схеме поступил на входную грань под тем же самым углом, что и входной пучок для обеспечения формирования пучка ПВО. В результате в точке синхронизации на грани ПВО, куда поступают исход-

ный пучок очередного импульса лазера и циркулирующий пучок, совершивший обход в зеркально-призменной линии задержки, происходит их синхронное суммирование. При этом данный процесс продолжается до определенного количества оборотов N , зависящего от величины потерь в рассматриваемой системе. Требуемое время распространения циркулирующего пучка при обходе, обеспечивающее синхронное суммирование пучков, подстраивается с помощью регулируемой системы оптической задержки, состоящей из зеркал $M2...M5$, количество которых может отличаться от четырех и также зависит от требуемого времени задержки и компоновочной схемы всего устройства. Блок управления, задает частоту и длительность импульсов излучения лазерного источника. Также данный блок осуществляет счет импульсов лазера до определенного количества N , соответствующего числу обходов в системе, и направляет сигнал на дефлектор, который при этом переключается на отражение и выводит импульс лазерного излучения с энергией W_N , соответствующей сумме энергий W_0 импульсов, поступавших от лазерного источника, с учетом потерь в системе σ . В результате этого на выходе из системы формируются лазерные импульсы высокой энергии с частотой следования, уменьшившейся в N раз, что в свою очередь соответствует увеличению энергетической эффективности подключенного к системе лазерного источника.

С учетом предположения, что лазерные пучки в кольцевой линии задержки после полного внутреннего отражения распространяются вдоль грани ПВО без потерь, схема на рисунке 1 позволяет практически в 12 раз повысить пиковую мощность и энергию исходных импульсов лазера в широком спектральном спектральном диапазоне. Однако при падении пучка излучения под критическим углом ПВО и его распространении вдоль грани возникают значительные потери, что приведет к снижению пиковой мощности и энергии исходного импульса на выходе из системы практически в 16 раз.

Очевидно, что использование на практике описываемой схемы для повышения энергетической эффективности лазерного источника, присоединенного к ней, невозможно.

Тем не менее, рассмотренное авторами использование явления полного внутреннего отражения может найти свое применение для повышения энергетической эффективности автономных лазерных систем за счет модификации приведенной на рисунке 1 схемы. Ее улучшение, к примеру, возможно путем замены призмы ПВО на аналогичную призму, изготовленную из материала с переменным показателем преломления или на другие градиентные оптические элементы (стержневые линзы, селфоки).

Литература

1. Mourou G.A., Fisch N.J., Malkin V.M., Toroker Z., Khazanov E.A., Sergeev A.M., Tajima T., Le Garrec B. Exawatt-Zettawatt pulse generation and applications. *Optics Communications*, 2012, vol. 285, pp. 720–724. DOI: 10.1016/j.optcom.2011.10.089.
2. Obronov I.V. et al. Solid-state Yb: YAG amplifier pumped by a single-mode laser at 920 nm. *Quantum Electronics*, 2018, 48 (3): 212, pp. 212–214. DOI: 10.1070/QEL16605.
3. Motes A. Laser beam combining. Rio-Rancho: AM Photonics, 2015, 132 p.
4. Brignon A. Coherent laser beam combining. Weinheim: Wiley-VCH, 2013, 509 p.
5. Alekseev V.A., Perminov A.S., and Yuran S.I. Increasing the peak power of a pulsed laser source using optical delay lines. *J. Opt. Technol.*, 2018, vol. 85, iss. 12, pp. 746–751. DOI: 10.1364/JOT.85.000746.
6. Алексеев В.А., Зарипов М.Р., Перминов А.С., Ситникова Е.А., Усольцев В.П., Юран С.И. Повышение пиковой мощности импульсного источника лазерного излучения с применением кольцевой волоконной линии задержки. Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10, № 2. – С. 151–159. DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-151-159.

УДК 681.7

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МАТРИЧНЫХ МОДУЛЕЙ КОРОТКОВОЛНОВОГО ИК-ДИАПАЗОНА ИНОСТРАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Киль И.А., Шилин А.А., Погорелов М.Г.

*Тульский государственный университет
Тула, Российская Федерация*

В статье проведён обзор современных иностранных матричных приёмников излучения коротковолнового ИК-диапазона и их характеристик, определены преимущества коротковолнового ИК-диапазона для его применения в составе ОЭС.

Ключевые слова: оптико-электронные системы, матричный приёмник излучения, коротковолновый ИК-диапазон.

Перспективным направлением развития оптико-электронных систем (ОЭС) является включение в их состав приборов на базе матричных модулей коротковолнового инфракрасного диапазона длин волн (1–2,5 мкм). Работа в коротковолновом ИК-диапазоне возможна из-за следующих факторов.

1. Свечения ночного неба, вызванного различными процессами в верхних слоях атмосферы, в частности, люминесценцией компонентов воздуха под действием космических лучей, метеоритов, атмосферных электрических разрядов и естественной радиации, а также хемилюминесценцией, связанной в основном с реакциями, идущими между атомами кислорода, водорода, натрия, углекислого газа, озона, воды, окислов азота и гидроксильными радикалами [1].

2. Свечения сильно нагретых тел (несколько сотен градусов), согласно закону Планка.

Это позволяет ОЭС на базе матричных модулей коротковолнового инфракрасного диапазона длин волн работать круглосуточно, а меньшая длина волны увеличивает их дифракционный предел разрешения (по сравнению с средне- и длинноволновыми ИК-диапазонами). Однако, как показал анализ иностранных серийно выпускаемых матричных модулей коротковолнового диапазона (таблицы 1–3), существующий размер пикселя в 10–15 раз превосходит рабочую длину

волны. Это не позволяет полностью использовать все преимущества данного диапазона и создать круглосуточную ОЭС с разрешением телевизионных систем.

Кроме того, свечение ночного неба обладает невысокой энергетикой, и для работы ОЭС в тёмное время суток требуется применение светосильной оптики, что значительно увеличивает массогабаритные параметры прибора и сложность, а, следовательно, и стоимость, объектива.

Однако, следующие преимущества коротковолнового ИК-диапазона дают обоснование на его применение в составе ОЭС:

- возможность наблюдения в условиях пониженной видимости – пыли, тумана, дыма, дождя;
- возможность обнаруживать лазерные сигналы для задач целеуказания объектов и измерения дальности до них;
- возможность наблюдения фоно-целевой обстановки в тёмное время суток;
- уменьшение влияния солнечных бликов от водных поверхностей;
- повышение помехозащищённости работы ОЭС – в качестве дополнительного информационного канала.

В состав современных матричных модулей коротковолнового инфракрасного диапазона длин волн обычно входят:

- матрица фоточувствительных элементов, которая преобразует принятое излучение фоно-целевой обстановки в электрические сигналы,
- мультиплексор, который считывает электрические сигналы с матрицы с требуемой частотой и производит их первичную обработку,
- электронные платы, обеспечивающие обработку сигналов с мультиплексора, которые реализуют алгоритмы улучшения изображения и формируют видеосигнал, поступающий в аппа-

ратуру управления объекта, а также принимают и обрабатывают команды, приходящие от аппаратуры объекта.

В функционал таких модулей уже заложено большинство требований, предъявляемых к оптико-электронному прибору в целом, среди которых особо стоит отметить:

– функционирование в реальном масштабе времени;

– автоматическая коррекция неоднородности изображений, вызванной геометрическим шумом матрицы фоточувствительных элементов и нелинейностью их передаточной функции;

– замещение дефектных элементов матрицы фоточувствительных элементов;

– изменение увеличения, масштаба и формата изображения;

– повышение качества изображения путем увеличения его резкости и «подчеркивания» границ изображений отдельных объектов сцены;

– автоматическая регулировка контраста и яркости как в изображении всей сцены, так и в локальных ее частях;

– стабилизация изображения (поля наблюдения);

– устранение дискретности изображения при помощи алгоритмов интерполяции;

– подавление нежелательных мощных сигналов, например, орудийных вспышек;

– выдача управляющих команд для автофокусировки;

– отображение требуемых данных и символов – текущего времени, прицельных сеток, и т. д.

Таблица 1 – Характеристики МПИ иностранного производства для диапазона 0,9–2,5 мкм, часть 1

Наименование МПИ, производитель	Формат МПИ, пкс (размер пикселя, мкм)	Спектральный диапазон (материал)
FPA-640x512, ANDANTA	640×512, 25	0,9–1,7 InGaAs
Cardinal 640, SCD	640×512, 15	0,6–1,7 InGaAs
ISC1202 SWIR, FLIR	640×512, 15	0,9–1,7 InGaAs
ISC1202 Vis-SWIR, FLIR	640×512, 15	0,6–1,7 VisGaAs
Owl 640 S, Raptor photoics	640×512, 15	0,9–1,7 InGaAs
Snake SW, Lynred	640×512, 15	0,9–1,7 InGaAs
SWIR Imager, SCD	640×512, 15	0,6–1,7 InGaAs
WiDy NaNo 640V-S, Pembroke instruments	640×512, 15	0,9–1,7 InGaAs
XSW 640 CL, Xenics	640×512, 20	0,9–1,7 InGaAs
SW640, Ghopto	640×512, 15	0,9–1,7 InGaAs
1280JSX, Sensors Unlimited	1 280×1 024 12,5	0,5–1,7 VisGaAs

Таблица 2 – Характеристики МПИ иностранного производства для диапазона 0,9–2,5 мкм, часть 2

Наименование МПИ, производитель	Частота смены кадра, Гц	Напряжение питания, В	Квантовая эффективность, %
FPA-640x512, ANDANTA	–	–	70
Cardinal 640, SCD	60	–	80
ISC1202 SWIR, FLIR	240	4,9–5,5	65
ISC1202 Vis-SWIR, FLIR	240	4,9–5,5	80
Owl 640 S, Raptor photoics	–	12	80
Snake SW, Lynred	100–300	3,6	70
SWIR Imager, SCD	30	5	70
WiDy NaNo 640V-S, Pembroke instruments	–	4–6	–
XSW 640 CL, Xenics	–	2,8	80
SW640, Ghopto	60–240	–	70
1280JSX, Sensors Unlimited	60	8–16	–

Таблица 3 – Характеристики МПИ иностранного производства для диапазона 0,9–2,5 мкм, часть 3

Наименование МПИ, производитель	Диапазон рабочих температур, °С	Габаритные размеры, мм
FPA-640×512, ANDANTA	–	–
Cardinal 640, SCD	–40–+71	–
ISC1202 SWIR, FLIR	–	27,8×25,4×9,42
ISC1202 Vis-SWIR, FLIR	–	27,8×25,4×9,42
Owl 640 S, Raptor photoics	0–+60	–
Snake SW, Lynred	–40–+71	42×30×9
SWIR Imager, SCD	–40–+71	31×31×32
WiDy NaNo 640V-S, Pembroke instruments	0–+65	25×25×29
XSW 640 CL, Xenics	–45–+85	45×45×56
SW640, Ghopto	–40–+71	36×25,4×7,2
1280JSX, Sensors Unlimited	–40–+71	50,8×50,8×61,7

Литература

1. Якушенок Ю.Г. Современные проблемы инфракрасной техники / В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенок. – М.: Изд. МИИГА и К, 2011. – 84 с.

УДК 681

ТЕПЛОВИЗОР БЛИЖНЕГО ИК ДИАПАЗОНА Коваленко М.Н., Минько А.А., Понарядов В.В.

Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

В последние годы все большее значение при решении хозяйственных задач и задач контроля за возможными чрезвычайными ситуациями приобретает концепция мониторинга, подразумевающая постоянный, дистанционный контроль за изменением различных компонентов окружающей среды под влиянием многочисленных факторов (в первую очередь техногенных). Элементом такого мониторинга является инфракрасная съемка с использованием авиа- и космической техники. Съемка в ИК диапазоне также позволяет решать ряд специальных задач.

Целью работы является создание высокочувствительного тепловизора на основе охлаждаемого матричного фотоприемника для регистрации тепловых изображений и синтеза видеосигнала в спектральном диапазоне от 0,9 до 1,7 микрон. Была поставлена задача с помощью минимального набора технических средств реализовать устройство, позволяющее регистрировать с максимально возможным временем интегрирования (1 секунды на кадр) слабые тепловые изображения различных источников или формировать с максимально возможной частотой регистрации (до 300 кадров в секунду) поток видеоданных. При этом, тепловизор должен позволить наблюдать изображение на экране стандартного телевизионного приемника, то есть обеспечить формирование видеосигнала в стандарте NTSC.

Разработанный тепловизор ближнего ИК диапазона, оснащенный оптической системой (объективом Гелиос-103), позволяет создать компактную монологаритную целевую аппаратуру для спутников ДЗЗ или беспилотных летательных аппаратов, обладающую малыми габаритами, повышенной надежностью и небольшим энергопотреблением.

Новизна предлагаемой к реализации аппаратуры заключается:

- в технической реализации аппаратуры на приборах радиационно-стойкой программируемой логики без применения высокоинтегрированных специализированных компьютерных решений, которые ухудшают надежность и долговечность и соответственно без использования операционных систем типа DOS, QNX, Linux или Windows.

- в оснащении аппаратуры системой распознавания объектов, позволяющей минимизировать объем передаваемой на землю видеoinформации, что существенно ослабляет требования к пропускной способности каналов связи.

Разработана структурная схема тепловизора, которая приведена на рисунке 1.

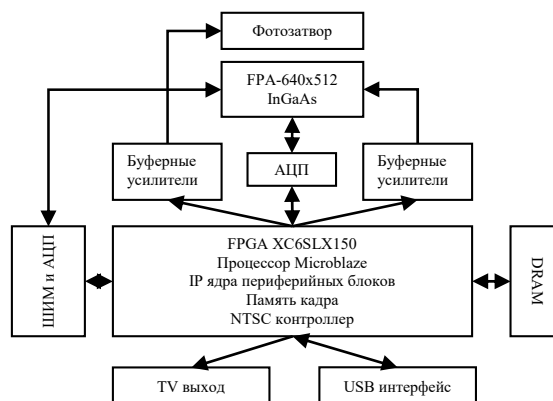


Рисунок 1 – Структурная схема тепловизора

Система состоит из интерфейсного блока, блока фотоприемника, блока памяти данных на 64 МБ, блока памяти шумовой подставки, блока аппаратной коррекции данных и блока формирования телевизионного сигнала. В связи с необходимостью охлаждения ИК фотоприемника до температуры $-30/-40$ градусов Цельсия, также разработан блок питания и регулировки температуры встроенного пельтье-холодильника фотоприемной матрицы. Для регистрации темных шумов в блоке памяти шумовой подставки использован электромагнитный фотозатвор.

В качестве фотоприемника выбран инфракрасный матричный фотоприемник ближнего ИК диапазона FPA-640×512 InGaAs Imager производства компании ANDANTA GmbH (Германия). Фотоприемник имеет размерность 640 на 512 пикселей с размером каждого 25×25 мкм. Анализ технической информации на фотоприемник показал, что базовым мультиплексором для этого фотоприемника является мультиплексор FLIR ISC9902 компании FLIR (США). Максимальная скорость чтения данных составляет 110 Гц при использовании 1 аналогового выхода и, соответственно 440 Гц при использовании 4 аналоговых выходов одновременно.

Основные блоки тепловизора изготовлены с использованием FPGA матрицы Spartan-6 XC6SLX150, в которой размещаются все основные узлы из перечисленных в структурной схеме (1).

Интерфейс USB выполнен на процессоре CY7C68013A-56LFX. Внешняя к FPGA микросхема динамической памяти NT5CC64M16GP-DII используется как память программы микро-

процессора Microblaze и для хранения видеоданных. Учитывая необходимость организации динамического изменения режимов работы тепловизора, в FPGA был синтезирован микропроцессор Microblaze, программное обеспечение которого загружается при включении устройства из конфигурационной микросхемы FLASH памяти.

Для записи видеопотока в память использовался режим прямого доступа (DMA, канал 1), при чтении видеоданных через USB также использовался режим прямого доступа (DMA, канал 2). Синтез видеосигнала формата NTSC происходит в IP ядре, к которому подключена двухпортовая, встроенная в FPGA память на 1 кадр. Таким образом происходит синхронизация чтения данных с телевизионным сигналом.

Для преобразования аналогового видеосигнала с фотоприемника применен 4-х канальный 16 разрядный быстродействующий АЦП (максимально 30 MSPS). Таким образом в 4 раза увеличивается скорость оцифровки данных с фотоприемника при переводе его в режим параллельного чтения видеосигнала по 4 выходам одновременно.

Для стабилизации тока пельтье-холодильника использована ШИМ модуляция тока (IP ядро в FPGA) и коммутатор тока на полевом транзисторе SIR464DP-T1-GE3 с отсечкой максимального тока на компараторе MAX999. Контроль температуры осуществляется по встроенному в фотоприемник терморезистору, падение напряжение на котором измеряется с помощью 16 разрядного SAR АЦП AD7686. Ток холодильника регулируется в пределах 0–3 ампера и может задаваться программно. Стабилизация температуры фотоприемника осуществляется ПИД регулятором, который выполнен аппаратно, как часть IP ядра (2).

Внешний вид тепловизора приведен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Внешний вид тепловизора

Разработанный тепловизор успешно опробован в различных режимах регистрации изображения и видео. В настоящее время проводятся работы по его температурной калибровке.

В качестве грубого калибратора первоначально была использована паяльная станция Ersa DIGITAL 2000A, обладающая регулятором температуры с возможностью поддержания заданного значения с точностью $\pm 0,5$ градусов. На рисунке 3 приведено тепловизионное изображение жала паяльника с установленной температурой в 240 градусов с расстояния 8 метров.

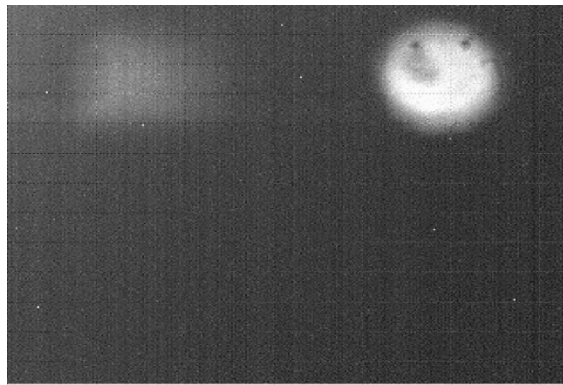


Рисунок 3 – Тепловизионное изображение жала паяльника

Тепловизор без источника питания и оптической системы весит 511 грамм.

В результате измерения потребляемой мощности тепловизора получены следующие данные:
– потребляемая мощность без охлаждения приемника составила 1,4 Вт при питании от 12 В источника.

– Потребляемая мощность с охлаждением приемника составила 11,4 Вт при питании от источника напряжением 12 В. При этом температура внутри приемника поддерживается на уровне $-20 \pm 0,2$ градусов (охлаждение горячей стороны конвекционное). Вес тепловизора обусловлен применением массивного корпуса – радиатора, который необходим для рассеяния выделяемого холодильником тепла. В будущем тепловизор планируется использовать в малогабаритной бортовой аппаратуре для создания систем мониторинга пожаров.

Литература

1. Разработка и применение спектральных приборов с многоканальными фотоприемными устройствами / Я.И. Дидковский, М.Н. Коваленко, А.А. Минько, М.Р. Последович // Вестник БГУ. Сер. 1. – 2013. – № 3: научное издание. – Минск: БГУ.
2. Экспериментальный образец широкозахватного оптоэлектронного сканера с системой регистрации, хранения и обработки данных в составе многоспектрального ИК-радиометра для спутников дистанционного зондирования Земли / Я.И. Дидковский, М.Н. Коваленко, А.А. Минько, М.Р. Последович, С.Н. Шарашкин // VII Белорусский космический конгресс: материалы конференции. Минск, 24–26 октября 2017 г.

УДК 681.7.023.72

ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОБРАБОТКИ КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Козерук А.С., Диас Гонсалес Р.О., Кузнечик В.О., Богданович Д.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Теоретические исследования обработки конической поверхности сводились к оптимизации наладочных параметров технологического оборудования с точки зрения достижения максимальных значений качества поверхности и производительности процесса (в нашем случае минимальных значений относительных расхождений путей трения $\Delta l_{отн}$ и максимальных средних арифметических их значений $l_{ср}$ соответственно). При оптимизации первоначально назначали средние значения $v_{и} = 5,0 \text{ с}^{-1}$, $v_2 = 4,0 \text{ с}^{-1}$, $e = 0,01 \text{ м}$, $L = 0,04 \text{ м}$, $v_к = 3,0 \text{ с}^{-1}$ и определяли значение отношения $v_{пл}/v_{и}$, при котором достигалось минимальное значение $\Delta l_{отн}$. Используя выявленное оптимальное значение $v_{пл}/v_{и}$ и средние v_2 , e , L , $v_к$, оптимизировали частоту вращения инструмента $v_{и}$, и т.д. до получения оптимальных значений всех наладочных параметров технологического оборудования. Результаты расчетов приведены на рисунке 1, а их анализ – в таблице 1. Из таблицы следует, что при оптимальном отношении частот $v_{пл}/v_{и}$ средних $v_{и}$, v_2 , e , L , $v_к$ параметр $l_{ср}$ достигает значения 2,2 м при удовлетворительном параметре качества $\Delta l_{отн} = 16 \%$. Такой режим обработки целесообразно назначать на операциях предварительного (грубого) и основного (среднего) шлифования абразивной суспензией микропорошков М40 и М20 соответственно. Для окончательного (мелкого) шлифования абразивной суспензией микропорошка М10 можно рекомендовать режим обработки на оптимальных $v_{пл}/v_{и}$, $v_{и}$ и средних v_2 , e , L , $v_к$. При этом $l_{ср} = 1,3 \text{ м}$, а $\Delta l_{отн} = 6,7 \%$. Заключительную стадию обработки – полирование – следует выполнять при оптимальных $v_{пл}/v_{и}$, $v_{и}$, v_2 , L и средней скорости конуса $v_к$. В этом случае $l_{ср} = 0,8 \text{ м}$, а $\Delta l_{отн} = 4,1 \%$, т.е. качество обеспечивается максимальное из возможного.

Кроме отмеченного, из анализа рисунка 1 следует, что параметр e практически не влияет как на точность обработки, так и на производительность процесса (горизонтальное расположение зависимостей 4 на рисунках 1, а и 1, б). Это значит, что обсуждаемый наладочный параметр можно не задействовать, т.е. обработку проводить без смещения планшайбы относительно инструмента вдоль оси симметрии выходного звена исполнительного механизма технологического оборудования.

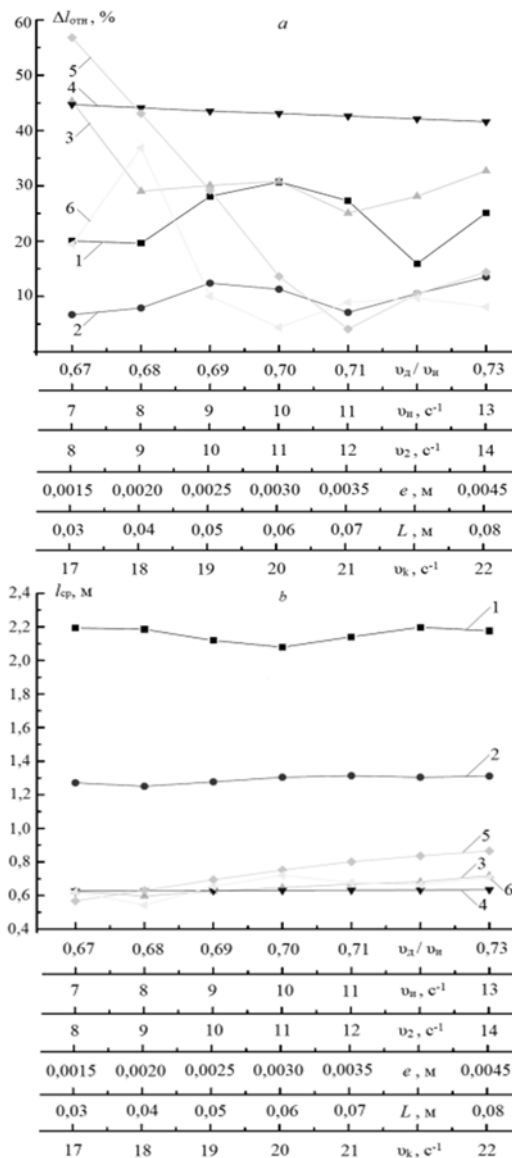


Рисунок 1 – Закономерности изменения относительного расхождения $\Delta l_{отн}$ (а) и среднего арифметического значения $l_{ср}$ (б) путей трения при обработке боковой поверхности конической линзы в зависимости от величины $v_{пл}/v_{и}$ при $v_{и} = 5,0 \text{ с}^{-1}$, $v_2 = 4,0 \text{ с}^{-1}$, $e = 0,01 \text{ м}$, $L = 0,04 \text{ м}$, $v_к = 3,0 \text{ с}^{-1}$ (1); $v_{и}$ при $v_{пл}/v_{и} = 0,72$ и прежних $v_2, e, L, v_к = 3,0 \text{ с}^{-1}$ (2); v_2 при $v_{пл}/v_{и} = 0,72$, $v_{и} = 0,7 \text{ с}^{-1}$ и прежних $e, L, v_к$ (3); e при $v_{пл}/v_{и} = 0,72$, $v_{и} = 0,7 \text{ с}^{-1}$, $v_2 = 1,2 \text{ с}^{-1}$ и прежних $L, v_к$ (4); L при $v_{пл}/v_{и} = 0,72$, $v_{и} = 0,7 \text{ с}^{-1}$; $v_2 = 1,2 \text{ с}^{-1}$, $e = 0,002 \text{ м}$ и прежней $v_к$ (5); $v_к$ при $v_{пл}/v_{и} = 0,72$, $v_{и} = 0,7 \text{ с}^{-1}$, $v_2 = 1,2 \text{ с}^{-1}$, $e = 0,002 \text{ м}$, $L = 0,07 \text{ м}$ (6)

Таблица 1 – Результаты анализа рисунка 1

Наладочный параметр	Номер кривой на рис. 2	Оптимальное значение наладочного параметра	Минимальное значение $\Delta l_{\text{отн}}$, %	$l_{\text{ср}}$, м	Предлагаемая технологическая операция
$v_{\text{пл}}/v_{\text{н}}$	1	$v_{\text{пл}}/v_{\text{н}} = 0,72$	16	2,2	грубое и среднее шлифование
$v_{\text{н}}$	2	$v_{\text{н}} = 0,7 \text{ с}^{-1}$	6,7	1,3	мелкое шлифование
v_2	3	$v_2 = 1,2 \text{ с}^{-1}$	25	0,7	
L	5	$L = 0,07 \text{ м}$	4,1	0,8	полирование
$v_{\text{к}}$	6	$v_{\text{к}} = 2,0 \text{ с}^{-1}$	4,4	0,7	

Для проверки результатов расчета, изложенных на рисунке 1 и в таблице 1, выполнено ряд экспериментальных исследований, которые сводились к шлифованию боковой поверхности конической детали из стекла К8 с теми же геометрическими параметрами, что и в случае теоретических исследований. Шлифование выполнялось абразивной суспензией микропорошка М10 концентрации Т: Ж = 1:5 (Т – твердая фаза – абразивный порошок, Ж – жидкая фаза – вода). Обработка выполнялась на серийном шлифовально-полировальном станке мод. ЗШП-350.

При обработке конической поверхности детали определяли закономерности изменения ее стрелки прогиба в зависимости от времени обработки. Результаты этих экспериментов приведены на рисунке 2 и 3, причем первый из них отображает качество обработки, а второй – производительность.

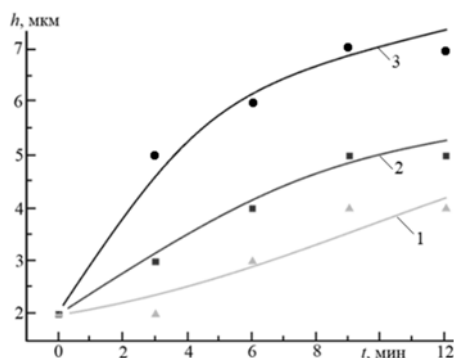


Рисунок 2 – Закономерности изменения исходной стрелки прогиба $h = 0,002 \text{ мм}$ боковой поверхности конической линзы в зависимости от времени шлифования t при: $v_{\text{д}}/v_{\text{н}} = 0,72$, $v_{\text{н}} = 5,0 \text{ с}^{-1}$, $v_2 = 4,0 \text{ с}^{-1}$, $e = 0,004 \text{ мм}$, $L = 0,04 \text{ м}$, $v_{\text{к}} = 3,0 \text{ с}^{-1}$ (1); $L = 0,07 \text{ м}$, $v_{\text{к}} = 2,0 \text{ с}^{-1}$, $v_{\text{д}}/v_{\text{н}} = 0,8$, $v_{\text{н}} = 5,0 \text{ с}^{-1}$, $v_2 = 4,0 \text{ с}^{-1}$, $e = 0,004 \text{ мм}$ (2); $v_{\text{д}}/v_{\text{н}} = 0,72$, $v_{\text{н}} = 1,1 \text{ с}^{-1}$, $v_2 = 1,2 \text{ с}^{-1}$, $e = 0,004 \text{ мм}$, $L = 0,07 \text{ м}$, $v_{\text{к}} = 3,0 \text{ с}^{-1}$ (3)

На стадии исследования качества обработки в каждой серии экспериментов использовали исходную коническую заготовку с отклонением образующей ее боковой поверхности от прямолинейности $h = 0,002 \text{ мм}$, а в случае изучения производительности исходное отклонение h составляло $0,015 \text{ мм}$.

Из анализа рисунка 2 следует, что если использовать средние значения наладочных пара-

метров $v_{\text{н}}$, v_2 , e , L , $v_{\text{к}}$ и оптимальное отношение $v_{\text{пл}}/v_{\text{н}}$, то за 12 мин шлифования отклонение образующей конуса от прямолинейности с исходных $0,002 \text{ мм}$ увеличится до $0,005 \text{ мм}$ (кривая 1 на рисунке 2), а в случае средних L , $v_{\text{к}}$ и оптимальных $v_{\text{пл}}/v_{\text{н}}$, $v_{\text{н}}$, v_2 , e – до $0,007 \text{ мм}$ (кривая 2 на рисунке 2). Если же применять оптимальные $v_{\text{пл}}/v_{\text{н}}$, $v_{\text{н}}$, v_2 , e , L и среднюю частоту вращения конуса $v_{\text{к}}$, то исходная погрешность непрямолинейности увеличится только на $0,002 \text{ мм}$ (кривая 3 на рисунке 2). Эти результаты согласуются с теоретическими исследованиями (кривые 1,4,5 на рисунке 1а соответственно).

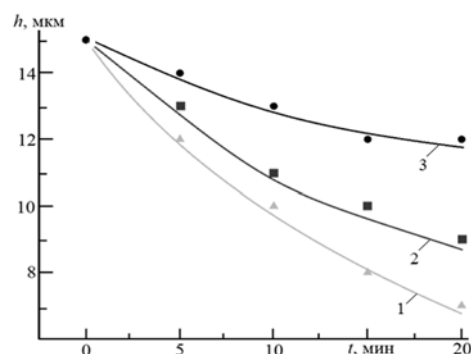


Рисунок 3 – Закономерности изменения исходной стрелки прогиба $h = 0,015 \text{ мм}$ боковой поверхности конической линзы в зависимости от времени шлифования t при: $v_{\text{д}}/v_{\text{н}} = 0,72$, $v_{\text{н}} = 5,0 \text{ с}^{-1}$, $v_2 = 4,0 \text{ с}^{-1}$, $e = 0,004 \text{ мм}$, $L = 0,04 \text{ м}$, $v_{\text{к}} = 3,0 \text{ с}^{-1}$ (1); $v_{\text{д}}/v_{\text{н}} = 0,72$, $v_{\text{н}} = 1,1 \text{ с}^{-1}$, $L = 0,04 \text{ м}$, $v_{\text{к}} = 3,0 \text{ с}^{-1}$; $v_2 = 4,0 \text{ с}^{-1}$, $e = 0,01 \text{ мм}$ (2); $v_{\text{д}}/v_{\text{н}} = 0,72$, $v_{\text{н}} = 1,1 \text{ с}^{-1}$, $v_2 = 1,2 \text{ с}^{-1}$, $e = 0,004 \text{ мм}$, $L = 0,07 \text{ м}$, $v_{\text{к}} = 2,0 \text{ с}^{-1}$ (3)

Анализ результатов производительности обработки показывает, что этот показатель достигает максимального значения при оптимальном отношении частот $v_{\text{пл}}/v_{\text{н}}$ и средних значениях $v_{\text{н}}$, v_2 , e , L , $v_{\text{к}}$ (кривая 1 на рисунке 3), когда за 20 мин обработки исходная стрелка прогиба величиной $0,015 \text{ мм}$ уменьшилась до $0,007 \text{ мм}$. Если же назначить оптимальные $v_{\text{пл}}/v_{\text{н}}$ и $v_{\text{н}}$, а v_2 , e , L и $v_{\text{к}}$ средние, то за тот же промежуток времени h уменьшится до $0,009 \text{ мм}$ (кривая 2 на рисунке 3). В случае использования наладочных параметров всех из области оптимальных значений, то исходная стрелка прогиба уменьшится только на $0,003 \text{ мм}$ (с $0,015$ до $0,012 \text{ мм}$, кривая 3 на рисунке 3).

УДК 681.7.023.72

СПОСОБ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С КОНИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Козерук А.С., Диас Гонсалес Р.О., Кузнечик В.О., Семченок А.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Для обработки традиционных оптических деталей (линз, призм, пластин) в настоящее время применяют, в основном, метод свободного притирания как один из наиболее точных и не требующих прецизионного технологического оборудования. В работе [1] обосновано, что этот метод может быть использован также и для получения деталей с рабочей конической поверхностью (аксиконов), образующая которой должна быть строго прямолинейной. Для обеспечения последнего требования заготовку конической детали в обсуждаемой технологии притирают к инструменту, плоскостность которого поддерживается правильником в виде стеклянной пластины специальной конструкции.

Предлагаемый метод доводки плоской поверхности представляет собой притирание двух тел через слой абразивной суспензии, причем контакт между этими телами обеспечивается силовым, а не геометрическим, замыканием [2]. В результате такого притирания контактирующие поверхности приобретают либо плоскую, либо сферическую форму, причем кривизна этих поверхностей управляется изменением наладочных параметров технологического оборудования, к которым относятся: диаметр инструмента d_c и частота его вращения ν_c , величина амплитуды возвратно-вращательного (колебательного) движения детали по инструменту (или наоборот) L и частота этого движения ν_2 , а также величина рабочего усилия P [3]. Причем на стадии шлифования регулируют, как правило, несколько из этих параметров, что ускоряет съем припуска с заготовки, а в процессе полирования – только один, обеспечивая плавное изменение геометрической формы обрабатываемой поверхности и создавая, тем самым, условия для более точного определения момента достижения заданных параметров качества детали [4].

Проведено математическое моделирование закономерностей процесса абразивной обработки плоских поверхностей в условиях свободного притирания на рычажных станках. Данное моделирование включало в себя формализацию специализированного технологического оборудования, его рабочей зоны и процесса формообразования на этом оборудовании плоской поверхности инструмента для обработки конической детали. В итоге получена формула для расчета скорости скольжения ν в выбранных по методике [6] опорных точках на обрабатываемой поверх-

ности и давление p в их окрестности. Используя эти величины, по формуле Ф. Престона.

В процессе численных исследований закономерностей обработки принимали, что интенсивность съема материала детали пропорциональна параметру

$$Q = \nu \delta. \quad (1)$$

При этом определяли значения каждого из наладочных параметров станка, обеспечивающих как равномерное распределение Q по всей обрабатываемой поверхности, что необходимо на стадии ее выхаживания после достижения заданной точности, так и преобладание этого параметра как в центральной, так и в краевой зонах детали. Два последних случая на практике используются в начальной стадии обработки в зависимости от характера распределения припуска: с преобладанием в краевой (общая «яма»), или центральной (общий «бугор») зонах заготовки детали.

В процессе определения значений наладочных параметров станка, при которых распределение Q принимает необходимый характер, применяли следующую методику. Учитывая производственную практику оптического приборостроения [8], а также принятые диаметры инструмента и детали, назначали следующие средние значения режимов обработки:

$$\nu_c = 6 \text{ н}^{-1}, \nu_2 = 3,2 \text{ н}^{-1}, \nu_a / \nu_c = 0,7, \quad (2)$$

где ν_a – частота вращения детали.

Первоначально выявляли оптимальную величину амплитуды L , при которой Q принимает одинаковое значение в центре и на краю детали, что соответствует равномерному съему припуска по обрабатываемой поверхности. Таким же образом определяли наиболее выгодные величины каждого из рассматриваемых наладочных параметров станка при средних значениях остальных из них.

Полученные результаты расчетов приведены на рисунок 1, где зависимости 2, 5 характеризуют закономерности обработки, при которой происходит равномерный съем материала детали по всей ее исполнительной поверхности. В нашем случае такая обработка имела место для следующих значений наладочных параметров станка: $L = 197$ мм, $d_c = 247$ мм, $\nu_2 = 3,3 \text{ н}^{-1}$, $\nu_a / \nu_c = 0,72$. Однако в начальной стадии величину параметров процесса формообразования следует назначать с учетом технологической наследственности заго-

товки. В частности, если припуск преобладает по периферии последней, то необходимо устанавливать следующие режимы обработки: $L = 221$ мм, $d_{\xi} = 270$ мм, $v_2 = 1,0 \text{ н}^{-1}$, $v_{\xi} = 18,5 \text{ н}^{-1}$, $v_a/v_{\xi} = 0,48$ (кривые 3, 6 на рисунке 1), а в случае, когда требуется обеспечить усиленный сьем материала в центральной зоне заготовки, целесообразно применять $L = 160$ мм, $d_{\xi} = 218$ мм, $v_2 = 6,8 \text{ н}^{-1}$, $v_{\xi} = 2,7 \text{ н}^{-1}$, $v_a/v_{\xi} = 0,99$ (кривые 1, 4 на рисунке 1).

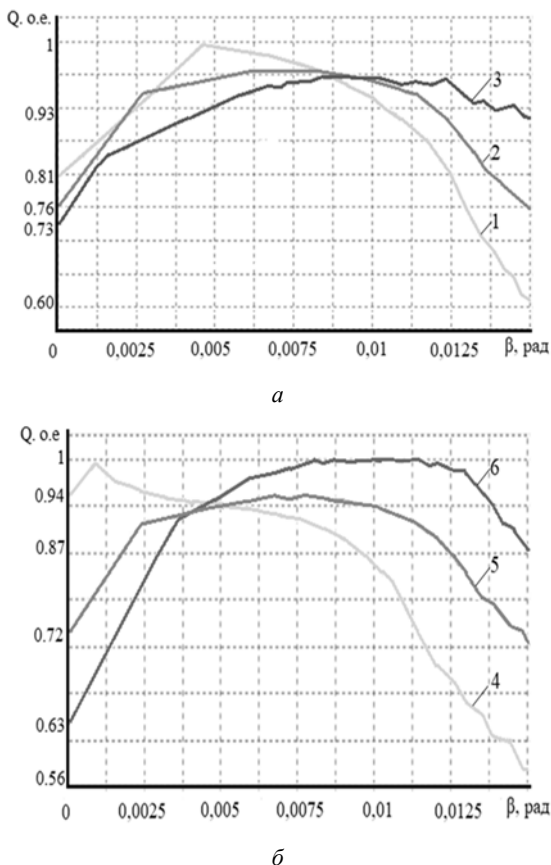


Рисунок 1– Характер изменения параметра Q в диаметральном сечении плоской детали: для $L = 160$ (1), 197 (2) и 221 (3) мм при $d_{\xi} = 250$ мм, $v_2 = 3,2 \text{ с}^{-1}$, $v_{\xi} = 6,0 \text{ с}^{-1}$, $v_a/v_{\xi} = 0,7$ (а); для $d_{\xi} = 218,4$ (4), 247,2 (5) и 269,7 (6) мм при $L = 200$ мм, $v_2 = 3,2 \text{ с}^{-1}$, $v_{\xi} = 6,0 \text{ с}^{-1}$, $v_a/v_{\xi} = 0,7$ (б)

Характерным для зависимостей на рисунке 1 является неравномерное распределение параметра Q на обрабатываемой поверхности. Такое изменение Q свидетельствует о том, что пути трения точек детали, находящихся в круговом кольце со средним радиусом, составляющим, как видно из рисунка 1, примерно $0,25 d_a$, достигают больших значений по сравнению с точками центральной и краевой зон. Эта закономерность объясняется особенностями метода свободного притирания двух тел, максимальная площадь перекрытия которых имеет место именно в упо-

мянутых круговых кольцах. Однако на практике отмеченный максимум параметра Q автоматически нивелируется за счет того, что увеличение путей трения в той или иной зоне обрабатываемой поверхности приводит к усилению съема припуска в данной зоне, уменьшая тем самым активную площадь ее контакта с инструментом. Это, в свою очередь, вызывает перераспределение рабочего усилия в области сопряжения притирающихся поверхностей: оно возрастает по периферии обсуждаемой области, увеличивая интенсивность съема припуска. Следовательно, имеет место самоорганизация процесса обработки по методу свободного притирания, который относится к прецизионному.

Особенностью выполненных численных исследований являлось то, что в процессе их проведения наладочные параметры станка изменяли на величину, при которой Q принимало одинаковые отклонения ΔQ от его распределения, обеспечивающего устранение как общей «яммы», так и общего «бугра». Такой подход позволил рассчитать чувствительность параметра Q к изменению режимов обработки и эффективность этих режимов с точки зрения производительности процесса.

Чувствительность σ определяли из соотношения

$$\sigma = \frac{\Delta Q}{\Delta N}, \quad (3)$$

где
$$\Delta N = \frac{|N' - N_0|}{N_0}. \quad (4)$$

В выражении (4) N_0 и N' – значения наладочных параметров станка, при которых происходит соответственно равномерный сьем припуска с обрабатываемой поверхности, и которые устанавливают при исправлении общей «яммы» и общего «бугра».

Эффективность наладочных параметров технологического оборудования k рассчитывали по формуле

$$k = \left| \frac{Q_{\text{ц}} - Q_{\text{кр}}}{Q_{\text{кр}}} \right|, \quad (5)$$

где $Q_{\text{ц}}$ и $Q_{\text{кр}}$ – значения Q в центре и на краю заготовки, которые получают для режимов обработки, применяемых в случае неравномерного распределения припуска на обрабатываемой поверхности.

Литература

1. Козерук А.С., Диас Гонсалес Р.О., Филонова М.И. и др. Моделирование технологического оборудования для обработки высокоточных оптических поверхностей // Весці НАН Беларусі. Сер. Фіз. тэхн. навук. – 2019. – № 3. – С. 134–140.

2. Семибратов М.Н. и др. Технология оптических деталей / М.Н. Семибратов, В.Г. Зубаков, С.К. Штандель. – М.: Машиностроение, 1978. – 416 с.
 3. Сулим А.М. Производство оптических деталей / А.В. Сулим. – М.: Высшая школа, 1969. – 303 с.

4. Зубаков В.Г. Технология оптических деталей / В.Г. Зубаков, М.Н. Семибратов, С.К. Штандель; под ред. М.Н. Семибратова. – М.: Машиностроение, 1985. – 368 с.

УДК 681.7.023.72

КОНЦЕПЦИЯ МОДУЛЬНЫХ СВЕТОДИОДНЫХ ПАНЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ИХ ПОДСВЕТКИ

Козерук А.С., Кулешов Д.Ю., Черепок Е.А., Шляхтун С.В., Шамкалович В.И.

Белорусский национальный технический университет
 Минск, Республика Беларусь

Рассмотрим создание модульных светодиодных панелей, предназначенных для подсветки различной информации. В качестве примера возьмем световой короб диаметром 1,3 метра (рисунок 1, а), который используется для подсветки эмблемы (рисунок 1, б).



а



б

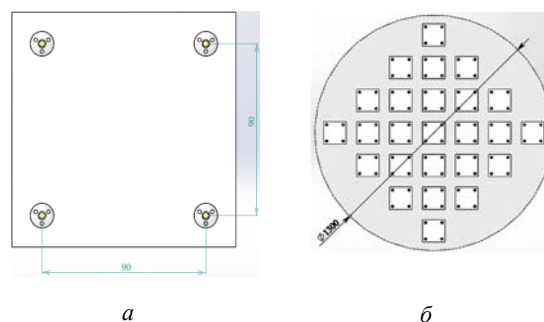
Рисунок 1 – Световой короб с диаметром 1,3 метра (а) и пример подсветки эмблемы световым коробом с диаметром 1,3 метра (б)

В данном световом коробе используются линейные светодиодные модули с линзой типа «Рыбий глаз» обеспечивающие равномерную подсветку эмблемы, яркость которой в различных точках эмблемы составляет 51–55 кд/м², а

средняя равномерность $\approx 0,85$. Использование данной линзы позволяет применять большее расстояние между светодиодами при сохранении равномерности подсветки, а также не допускает появление горящих точек от светодиодов

Несмотря на то, что данное расположение светодиодов (рисунок 1, а) обеспечивает равномерную подсветку эмблемы, для получения большей равномерности целесообразно использовать светодиодные модули с другим расположением светодиодов.

Рассмотрим другой вариант расположения светодиодов на модуле (рисунок 2, а). Возьмем световой короб диаметром 1,3 м из предыдущего примера и разместим модули (рисунок 2, б).



а

б

Рисунок 2 – Светодиодный модуль 90×90 мм (а) и вариант расположения светодиодных модулей в световом коробе диаметром 1,3 м (б)

В данной концепции используются SMD светодиоды 3030. С помощью линзы «Рыбий глаз» обеспечивается равномерная подсветка при расстоянии между светодиодами от 80 мм до 160 мм. При использовании данной линзы, горящие точки от светодиодов не наблюдаются при расстоянии от 5 см между поверхностью светового короба и освещаемой поверхности. На практике расстояние между модулями в большинстве случаев выбирают равным расстоянию между светодиодами. Допустимо увеличивать расстояние в случае подсветки не полностью прозрачного материала (матовое стекло, ткань). Также рассмотрим концепцию универсальных модульных светодиодных панелей, пример которой можно увидеть на рисунке 3.

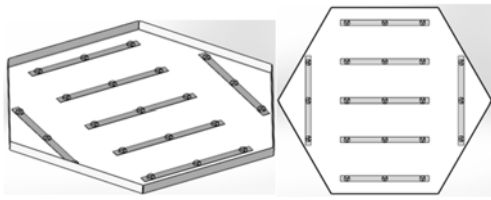


Рисунок 3 – Модульная светодиодная панель

В данной концепции модульные светодиодные панели имеют форму сот. Данная форма панели наиболее удобна при заполнении ими пространства различной формы и габаритов. Например, в качестве подсвечиваемой области возьмём эмблему, приведенную на рисунке 1, и разместим модульные панели, как показано на рисунке 4.

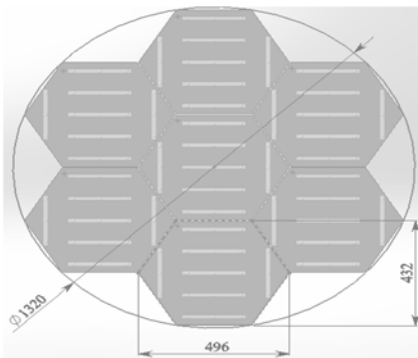


Рисунок 4 – Пример размещения модульных светодиодных панелей на подсвечиваемой области в форме круга

Другой пример размещения светодиодных панелей представлен на рисунке 5.

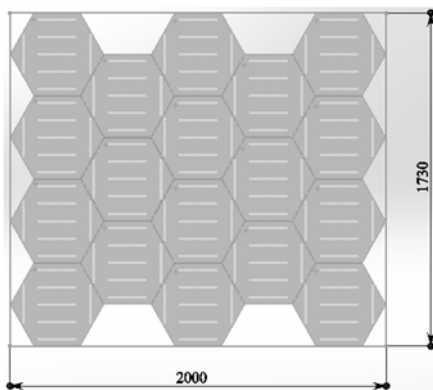


Рисунок 5 – Пример размещения модульных светодиодных панелей на подсвечиваемой области прямоугольной формы

Из обоих примеров видно, что область подсветки не заполняется полностью и остаются не подсвеченные зоны. Есть несколько вариантов решения:

1. Закрыть не подсвеченные зоны непрозрачным материалом. В данном случае пробелы не будут наблюдаться, но также и уменьшается область подсветки.

2. Размещать светодиодные панели на большем расстоянии от подсвечиваемой области. В таком случае, свет от соседних панелей с помощью линзы попадает на не подсвеченные области. Недостатком этого способа является увеличение толщины всей конструкции.

При расчете светодиодных панелей наиболее часто используют метод излучательности (метод диффузного отражения) и расчет в программе Dialux.. Сущность первой из этих методик состоит в том, что все поверхности сцены разбиваются на небольшие фрагменты, каждый из которых способен излучать, поглощать и отражать свет, по ним и производятся расчеты. Освещенность поверхности определяется собственным излучением тела и отраженными лучами, падающими от других тел (источников). Модель излучательности включает оба эти фактора и основана на уравнениях энергетического баланса. При этом выполняемые расчеты учитывают только взаимное расположение элементов сцены и не зависят от положения наблюдателя. В обсуждаемом методе шаги алгоритма изображения сцены сводятся к следующему:

1. Сцена разбивается на отдельные участки, для каждого из которых определяются значения $E_i, \alpha_i, \omega_{ij}, j = 1, 2, \dots, N$.

2. Находятся значения U_i для каждой из трех основных компонент цвета.

3. Для выбранной точки наблюдения строится проекция с удалением невидимых граней и осуществляется закрашивание, использующее значения U_i для задания интенсивности. При этом могут использоваться какие-либо алгоритмы, позволяющие сгладить изображение.

При расчете в программе Dialux задается тип источника света и его параметры и в результате расчета получают распределение света, а также значения освещенности и равномерность ее распределения по исследуемой освещаемой поверхности.

УДК 681.7.023.72

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ КОНИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Козерук А.С., Диас Гонсалес Р.О., Кузнечик В.О., Семченок А.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

В теории абразивной обработки по методу свободного притирания величину срабатывания материала детали принято оценивать по формуле Ф. Престона

$$U = k \int_i^{\dot{0}} v \delta dt, \quad (1)$$

где k – технологический коэффициент, зависящий от износостойкости материала заготовки и условий обработки; t – время обработки; v – скорость скольжения в произвольно выбранной опорной точке M на обрабатываемой поверхности, а p – давление в окрестности этой точки.

При обработке на рычажных станках скорость скольжения v обусловлена относительным и переносным движениями детали относительно заготовки, которые, в свою очередь, зависят от наладочных параметров технологического оборудования. Для установления этой зависимости создана математическая модель, определяющая распределение путей трения $L_{тр} = v t$ на образующей корпуса. В основе данной модели лежит метод преобразования координат

Рассмотрим расчётную схему рабочей зоны станка, содержащей коническую линзу (рис. 1), и введем системы координат (СК) следующим образом. СК $O_1X_1V_1Z_1$ связана с инструментом, причем точка O_1 расположена в его центре. СК $O_2X_2V_2Z_2$ также связана с инструментом, но повернута относительно $O_1X_1V_1Z_1$ на угол α_n вокруг оси O_1Z_1 .

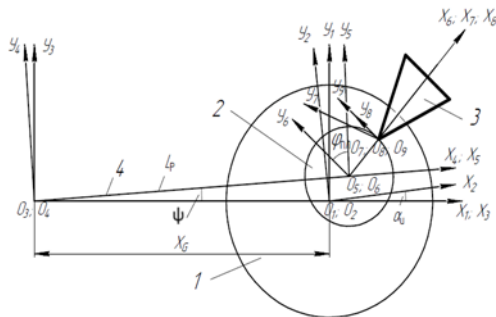


Рисунок 1

СК $O_3X_3V_3Z_3$ связана с осью вращения рычага, при этом ось O_3X_3 проходит через ось вращения инструмента и совпадает с его рабочей поверхностью.

СК $O_4X_4V_4Z_4$ также связана с осью рычага, но повернута относительно $O_3X_3V_3Z_3$ на угол ψ . В результате ось O_4X_4 направлена по оси рычага.

СК $O_5X_5V_5Z_5$ связана с центром вращения планшайбы, причем ось O_5X_5 направлена по оси

рычага. $O_6X_6V_6Z_6$ – аналогичная СК после поворота планшайбы на угол $\Phi_{пл}$.

СК $O_7X_7V_7Z_7$ связана с вершиной конуса, ось O_7X_7 лежит в плоскости планшайбы. СК $O_8X_8V_8Z_8$ также связана с вершиной конуса, но повернута вокруг оси O_7V_7 на угол $0,5 \alpha_k$, где α_k – угол при вершине конуса. В результате ось O_8X_8 совпадает с осью симметрии конуса.

Система координат $O_9X_9V_9Z_9$ связана с конусом и повернута относительно $O_8X_8V_8Z_8$ на угол $\Phi_k = \omega_k t$ вокруг оси O_8X_8 , где ω_k – скорость вращения конуса.

Координаты K_i -х точек на поверхности конической линзы в системе координат $O_9X_9V_9Z_9$ имеют вид

$$\begin{bmatrix} \tilde{O}_{\epsilon_i} \\ \dot{O}_{\epsilon_i} \\ Z_{\epsilon_i} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(i-1)h_k}{\epsilon-1} \\ 0 \\ \frac{r_k(i-1)}{\epsilon-1} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где h_k и r_k – соответственно высота конуса и радиус его основания.

Для определения координат точек, расположенных на поверхности линзы относительно инструмента, необходимо совместить СК $O_1X_1V_1Z_1$ с СК $O_9X_9V_9Z_9$. Данное совмещение производится с помощью матриц преобразования координат. В результате значения координат будут определяться:

$$\begin{bmatrix} \tilde{O}_{\epsilon_i} \\ \dot{O}_{\epsilon_i} \\ Z_{\epsilon_i} \\ 1 \end{bmatrix} = i_1 \delta i_2 \delta i_3 \delta i_4 \delta i_5 \delta i_6 \delta i_7 \delta i_8 \delta \begin{bmatrix} \tilde{O}_{\epsilon_i} \\ \dot{O}_{\epsilon_i} \\ Z_{\epsilon_i} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где

$$i_1 = \begin{bmatrix} \cos \lambda_{\epsilon} & -\sin \lambda_{\epsilon} & 0 & 0 \\ \sin \lambda_{\epsilon} & \cos \lambda_{\epsilon} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$i_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -\dot{O}_G \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$i_3 = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$\dot{i}_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_{\sigma\delta} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$\dot{i}_5 = \begin{bmatrix} \cos\varphi_{1\varepsilon} & -\sin\varphi_{1\varepsilon} & 0 & 0 \\ \sin\varphi_{1\varepsilon} & \cos\varphi_{1\varepsilon} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$\dot{i}_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & R_{1\varepsilon} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (9)$$

$$\dot{i}_7 = \begin{bmatrix} \cos\alpha_\varepsilon & 0 & \sin\alpha_\varepsilon & 0 \\ -\sin\alpha_\varepsilon & 0 & \cos\alpha_\varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$\dot{i}_8 = \begin{bmatrix} \cos\varphi_\varepsilon & -\sin\varphi_\varepsilon & 0 & 0 \\ \sin\varphi_\varepsilon & \cos\varphi_\varepsilon & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (11)$$

\tilde{O}_G – расстояние между осями вращения штанги и шпинделя станка; $L_{\sigma\delta}$ – длина штанги.

Подставив (2) в (3) и перемножив матрицы, получим выражение для определения X_{i1} , Y_{i1} , Z_{i1}

Путь трения в i -той точке поверхности конической линзы к j -тому моменту времени можно определить по формуле

$$L_{\omega_j} = L_{\omega_{j-1}} + \sqrt{(\tilde{O}_{ij} - \tilde{O}_{ij-1})^2 + (\dot{O}_{ij} - \dot{O}_{ij-1})^2 + (Z_{ij} - Z_{ij-1})^2}. \quad (12)$$

Однако формулой (12) можно воспользоваться только при условии попадания i -той точки в пятно контакта линзы и инструмента, что обусловлено двумя факторами: i -тая точка не должна находиться выше слоя свободного абразива. Следовательно, должно выполняться условие $Z_i < \lambda_{\text{абр}}$, где $\lambda_{\text{абр}}$ – размер зерна абразива.

Линза во время обработки может выходить за край инструмента. Следовательно, должно выполняться условие $R_\varepsilon^2 \geq \tilde{O}_{1i}^2 + \dot{O}_{1i}^2$, где R_u – радиус инструмента. Оба условия должны выполняться одновременно.

Используя вышеизложенную математическую модель, выполнены теоретические исследования закономерностей формообразования конической линзы. В качестве регулируемых параметров процесса обработки принимали частоты вращения инструмента, конуса v_k и входного звена исполнительного механизма станка, отношение частот вращения сепаратора и инструмента, а также амплитуду возвратно-вращательного движения первого из них по рабочей поверхности второго и их относительное смещение. Рассчитывали относительное расхождение путей трения, характеризующее качество обработки, и среднее арифметическое значение этих путей, пропорциональное производительности съема припуска с заготовки. Данные показатели определялись как при изменении каждого из отмеченных параметров в отдельности, так и при попарном их изменении в 15 различных комбинациях.

В технологии оптического приборостроения последний прием можно назначать только на стадии предварительного шлифования, поскольку одновременное регулирование двух и более наладочных параметров станка приводит к резкому изменению закономерностей съема припуска с заготовки и тем самым вызывает деформацию геометрической формы обрабатываемой поверхности. Это искажение формы детали можно исправить на последующих операциях. Если же такая погрешность возникнет на финишной операции полирования, то для исправления дефекта деталь необходимо перешлифовать и повторно полировать, что увеличивает ее себестоимость.

В процессе обработки конических поверхностей по методу свободного их притирания к плоской поверхности инструмента первоначально выявляют оптимальные наладочные параметры станка, после чего их уточняют путем последовательных изменений каждого из регулируемых параметров при неизменных достигнутых оптимальных значениях остальных. Так повторяли до тех пор, куда после оптимизации последнего из регулируемых параметров не получали постоянной величины относительных расхождений путей трения.

УДК 681.7.023.72

ЭТАПЫ ОБРАБОТКИ КОНИЧЕСКИХ ЛИНЗ

Козерук А.С., Диас Гонсалес Р.О., Кузнецик В.О., Мандик Н.С.

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Конические линзы находят широкое применение в различных лазерных инструментах, работа которых основана на использовании увеличенной фокусной глубины пучков Бесселя, генерируемых аксиконом. Это, например, лазерный инструмент для резки стекол значительной толщины, энергоэффективность и экономичность которого достигается за счет создания микротрещин по всей толщине материала, что вызывает его локальное ослабление и тем самым облегчает разделку на части посредством тепловой или механической нагрузки. Такой метод дает чистый срез и практически нулевую ширину прорези, которая не требует дополнительной обработки. Лазерные пучки Бесселя, кроме того, используются для формирования микро- и наноканалов в прозрачных материалах, для сверления тонких непрозрачных материалов и в ряде других областях при решении научных и прикладных задач.

Характерной конструктивной особенностью оптических деталей с исполнительной поверхностью второго порядка является необходимость их центрирования. Применительно к плоскоконическим линзам это значит, что ось вращения конуса должна быть перпендикулярна к его основанию, а также выдержана однородность деталей по высоте в обрабатываемой партии. Для обеспечения этих требований необходимы определенная последовательность технологических операций получения конуса с заготовок цилиндрической формы и специальные технические решения для реализации этих операций.

К технологическим операциям, обеспечивающим получение конической линзы с относительной высотой $h/d \leq 0,5$, где h – высота конуса, d – диаметр его основания, по предлагаемой технологии, относятся следующие:

- 1) шлифование оснований цилиндрических заготовок с выдерживанием их взаимной параллельности с точностью не более $\pm 0,002$ мм;
- 2) полирование одного из оснований цилиндра до достижения шероховатости $\leq R_z 0,05$ и отклонения от неплоскостности не более $\pm 0,00025$ мм;
- 3) крепление цилиндрической заготовки к вспомогательной плоскопараллельной стеклянной пластинке посредством оптического контакта (с помощью сил молекулярного сцепления);
- 4) механическое крепление цилиндрической заготовки цанговой переходной оправкой за плоскопараллельную стеклянную пластинку;
- 5) нанесение на цилиндрическую заготовку ближайшей сферы радиусом кривизны

$$R = \frac{h^2 + \frac{d^2}{4}}{2h}, \quad (1)$$

где h – стрелка прогиба сферической поверхности радиусом R ; d – внутренний диаметр кольца сферометра, которым используется для контроля радиуса R в процессе нанесения сферической поверхности на одно из оснований исходной цилиндрической заготовки;

6) нанесение конической поверхности на плоско-выпуклую линзу;

7) шлифование и полирование конической поверхности до достижения шероховатости $\leq R_z 0,05$ и отклонения от непрямолинейности обрабатываемой конуса не более $\pm 0,00025$ мм.

Для выполнения первых двух из перечисленных операций предлагается многоместное устройство, схема которого приведена на рисунке 1.

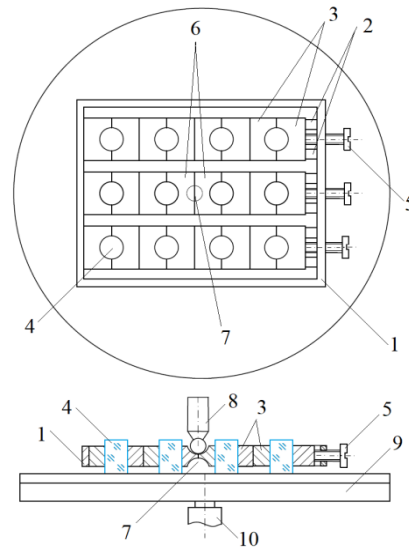


Рисунок 1 – Устройство для шлифования и полирования оснований заготовок цилиндрической формы

Устройство состоит из основания 1 прямоугольной формы, в котором смонтированы направляющие 2, несущие фиксирующие немагнитические сухарики 3 с полукруглыми отверстиями для крепления цилиндрических заготовок 4. В одной из боковых поверхностей основания установлены зажимные винты 5, а в находящихся на пересечении диагоналей основания 1 центральных фиксирующих сухариках 6 с двух сторон выполнены сферические лунки 7, в которые последовательно устанавливаются сферический наконечник поводка 8 выходного звена исполни-

тельного механизма базового шлифовально-полировального станка модели ШП. Устройство с закрепленными деталями устанавливается на инструмент в виде планшайбы 9, закрепленной на шпинделе 10 станка.

Устройство работает следующим образом. Первоначально в отверстия, образованные сухариками 3, устанавливаются цилиндрические заготовки 4 расчетной длины и зажимают винты 5. Сухарики перемещаются по направляющим 2 и жестко фиксируют цилиндрические заготовки. Полученный таким образом блок устанавливают на рабочую поверхность планшайбы 9, помещая в лунку 7 центральных фиксирующих сухариках 6 поводок 8 и шлифуют, соблюдая переходы, одно из оснований цилиндрических заготовок 4. Затем таким же образом шлифуют второе основание цилиндрических заготовок, выдерживая общую косину блока (разнотолщинность по четырем углам) в пределах $\pm 0,002$ мм. После этого одну из сторон блока (одно из оснований цилиндрических заготовок) полируют до $\leq R_0,05$ на плоском смоляном полировальнике.

Выполнения пятой операции обеспечивается посредством метода получения сферической поверхности радиусом R вращающимся кольцевым инструментом диаметром d , ось которого пересекает ось образующей сферы под определенным углом.

Последние две операции реализуются на специальном устройстве для обработки конических поверхностей. Причем при выполнении первой из них следует назначать режимы обработки, обеспечивающие высокую интенсивность съема припуска по всей обрабатываемой поверхности.

При обработке конических линз с относительной высотой $h/d > 0,5$ для выполнения пятой и шестой вышеизложенных технологических операций следует использовать устройство, приведенное на рисунке 2.

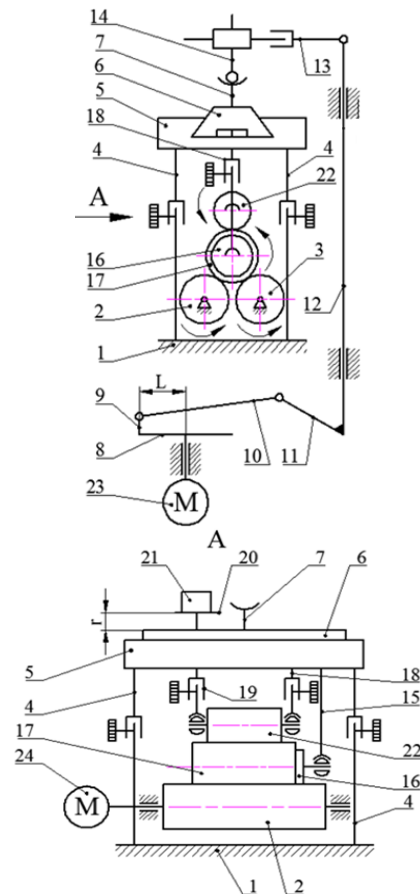


Рисунок 2 – Станок для изготовления деталей из заготовок цилиндрической формы:

- 1 – основание; 2 – абразивный цилиндрический инструмент; 3 – опорный элемент; 4 – регулируемые стойки; 5 – направляющая; 6 – несущий ползун; 7 – хвостик; 8 – входное звено; 9 – палец; 10 – шатун; 11 – рычаг; 12 – стойка; 13 – выходное звено переменной длины; 14 – поводок; 15 – держатель; 16 – наклейный инструмент; 17 – заготовка конической детали; 18 и 19 – регулируемые опоры; 20 – столик; 21 – груз; 22 – прижимной элемент; 23 и 24 – электродвигатели

УДК 681.7.054.22

ПРИБОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЧНОСТИ СКЛЕЙКИ ЛИНЗ

Кузнецов А.В.^{1,2}, Фёдорцев Р.В.¹

¹Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

²ОАО «Пеленг»

Минск, Республика Беларусь

Развитие современного оптического приборостроения требует создания светосильных оптических систем, формирующих изображение в пределах большого углового поля в пространстве предметов. Высокие требования к параметрам оптических систем и к качеству образованного ими изображения определяют сложность их конструкции. Так например, объективы проекционной фотолитографии или объективы камер про-

фессионального телевидения содержат десятки линз, к качеству изготовления которых предъявляются весьма жёсткие требования. Поэтому изготовление современных объективов, формирующих изображение высокого качества в каждой точке изображаемого пространства, представляет собой сложную технологическую задачу.

По определению центрированной оптической системой является оптическая система, в которой

центры кривизны сферических поверхностей и центры симметрии асферических поверхностей расположены на одной прямой, называемой оптической осью системы. Однако при изготовлении оптических систем неизбежно возникают погрешности центрирования. Они могут возникать непосредственно при формообразовании самой оптической детали, при склеивании оптических деталей, при установке оптических деталей в оправы, при сборке ряда оптических компонентов в единую оптическую систему. Можно выделить несколько видов погрешностей центрирования одиночного оптического элемента [1]. Главными следствиями наличия погрешностей центрирования в оптических системах являются смещение и наклон изображения, а также появление дополнительных aberrаций – aberrаций децентричности, ухудшающих качество изображения.

Развитие методов и средств определения погрешностей центрирования в оптических системах было вызвано ростом требований к качеству изготовления компонентов. На основе анализа источников информации [2–4] по изготовлению, исследованию и контролю оптических систем, предлагается классификация методов контроля погрешностей центрирования, представленная на рисунке 1.

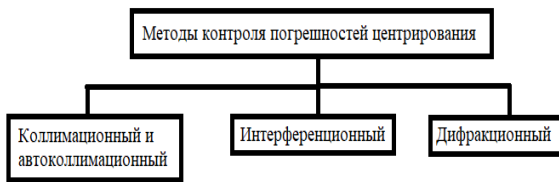


Рисунок 1 – Классификация методов контроля погрешностей центрирования

В практике современного оптического приборостроения наиболее распространены коллимационный и автоколлимационный методы контроля погрешностей центрирования. Достоинствами данных методов являются:

1. Простота реализации и наглядность выполнения измерений.
2. Невысокая длительность операций контроля.
3. Соизмеримая с другими методами пороговая чувствительность измерений.

Проектируемый прибор предназначен:

- 1) для контроля центрировки одиночных и склеенных линз;
- 2) для контроля центрировки линз при склейке;

Целью работы является повышение точности метода склейки линз и контроля качества выходных параметров готового изделия посредством разработки автоматизированных средств установки и фиксации оптических деталей.

Для достижения поставленной цели требуется осуществить выбор средств для визуализации процесса склеивания линз и разработать вариант конструкции приспособления для временной и быстрой фиксации линз в процессе установки. Общий вид базовой конструкции прибора, показан на рисунке 2.

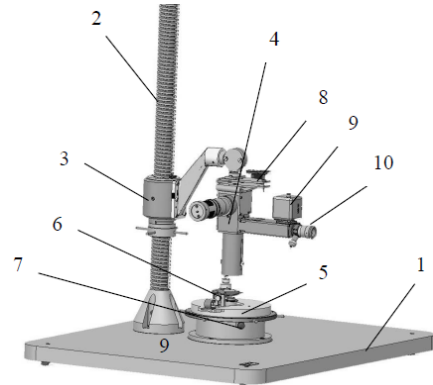


Рисунок 2 – Прибор для контроля склейки линз:
 1 – основание; 2 – стойка; 3 – кронштейн;
 4 – микроскоп автоколлимационный; 5 – предметный столик; 6 – кольцо опорное; 7 – опоры винтовые; 8 – механизм микроподвижки; 9 – излучатель; 10 – окуляр

На рисунке 3 представлена 3D модель нового варианта конструкции прибора, разработанная в программном пакете PTC Creo. Принципиальная оптическая схема стенда представлена на рисунке 4.

На основании прибора 1 крепится стойка 2 для перемещения по ней кронштейна 3 с автоколлимационным микроскопом 4 и предметный столик 5 с опорным кольцом 6 для базирования проверяемой детали.



Рисунок 3 – 3D модель нового вариант конструкции прибора

Винтовые опоры 7 основания обеспечивают устойчивое положение прибора и возможность выставки базовой поверхности в горизонтальное положение. Стойка и кронштейн обеспечивают плавное прямолинейное перемещение микроскопа в вертикальной плоскости. На кронштейне предусмотрен узел с микроподвижками 8, позволяющий совместить оптическую ось микроскопа с осью вращения столика с опорным кольцом.

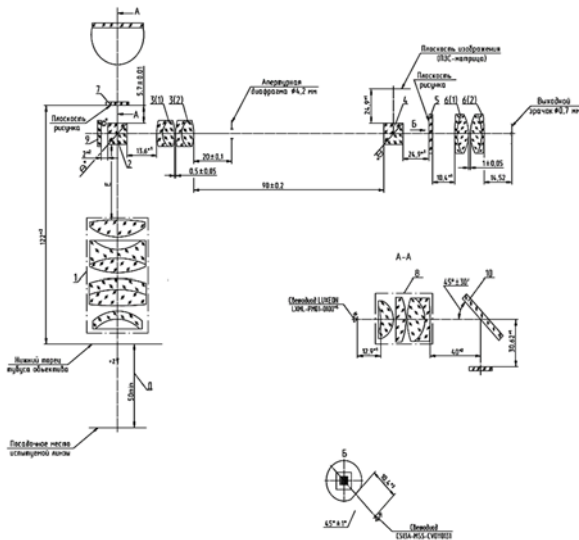


Рисунок 4 – Принципиальная оптическая схема

В качестве источника для подсветки перекрестия в автоколлимационном микроскопе используется излучатель 9. Наблюдение автоколлимационного изображения перекрестия на сетке микроскопа осуществляется как на мониторе телевизионной камеры (VBC-751), так и глазом через окуляр 10.

Проверка центровки одиночных линз. Линза, опираясь на призму, вращается на кольце при помощи диска. Линзу также можно вращать руками при отодвинутом диске, который предусмотрен для линз малых диаметров. Ось вращения линзы совпадает с её геометрической осью и проходит через центр сферической поверхности, лежащей на кольце. Проверять эту поверхность не следует.

Если автоколлимационная точка второй поверхности не лежит на оси вращения, то при вращении линзы изображение креста будет описывать окружность. Диаметр «боя», равный $4C$ (C – смещение центра сферы с оси вращения) измеряется по шкале окулярной сетки. Цена деления сетки отсчитывается по шкале тубуса объектива против индекса. Допустимый диаметр «боя» должен быть определён заранее на основании чертежного допуска на децентричность. Автоколлимационная точка, в плоскости положения которой производится измерение децентрировки, есть изображение центра сферы. Поэтому при измерении допустимого «боя» следует учитывать увеличение в сопряжённых плоскостях.

Увеличение определяется при расчёте автоколлимационных точек.

Проверка центровки склеенных линз. Склеенные линзы проверяются так же, как одиночные линзы. Склеенные линзы опираются на призму цилиндрическим ободом той линзы, которая является посадочной при сборке. Трубка последовательно фокусируется в плоскость положения всех автоколлимационных точек, кроме поверхности, лежащей на кольце, и измеряется диаметром «боя». Если одиночная или склеенная линза имеет плоский торец, который является опорным при сборке объектива, то она должна быть проверена относительно её обода и торца. В этом случае в гнездо сменных колец вставляется плоский металлический диск, на который помещается линза. При вращении линза опирается опорным торцом на диск, а ободом – на призму. В такой линзе следует проверить центровку всех сферических поверхностей.

Контроль линз при склейке. Склеенная пара линз помещается на кольцо. Призма и диск устанавливаются на одной высоте с линзой, лежащей на кольце так, чтобы вторая линза могла свободно перемещаться на первой. Линза, лежащая на кольце, должна быть предварительно проверена на децентрировку вне зависимости от технологии сборки объектива. Трубка фокусируется на наружную поверхность второй линзы. При вращении линз и одновременном наблюдении в трубку устраняется децентрировка этой поверхности перемещением второй линзы относительно первой. После того, как высохнет клей, приклеивается третья линза и центрируется аналогичным способом. При этом, трубка фокусируется на наружную поверхность третьей линзы.

Литература

1. Соколова Н.С. О допусках на децентрировку линз / Н.С. Соколова // Оптико-механическая промышленность. – 1973. – № 7. – С. 53–57.
2. Ельников Н.Т., Дитев А.Ф., Юрусов И.К. Сборка и юстировка оптико-механических приборов. – М.: «Машиностроение», 1974. – 348 с.
3. Зверев В.А. Влияние децентрировки поверхностей вращения на положение плоскости изображения / В.А. Зверев, Е.С. Рыгова, И.Н. Тимошук // Оптический журнал – 2010. – Т. 77, № 6. – С. 8–13.
4. Развитие новых направлений в отечественном оптическом и оптикоэлектронном приборостроении / В.А. Балоев [и др.] // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77, № 8. – С. 75–80.

УДК 621.791.725

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОПЕРЕДАЧИ ПРИ ПРОШИВКЕ КРЕМНИЕВОЙ ПОДЛОЖКИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Ланин В.Л.¹, Фам В.Т.¹, Петухов И.Б.²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Минск, Республика Беларусь

²ОАО «Планар-СО»

Минск, Республика Беларусь

Технология формирования сквозных отверстий методом лазерной прошивки в кремнии является важным производственным этапом в производстве полупроводников. При этом выбор источника лазерного излучения для проведения технологической операции является сложной задачей, определяемой спецификой воздействия лазерного излучения на данный полупроводник и особенностями технологической задачи. В зависимости от требований различные схемы лазерной обработки состоят из лазерного источника с коллиматором выходного пучка, блока управления лазерным источником, оптической системы фокусировки и отклонения лазерного луча (сканера) и координатной системы по осям X,Y,Z с установленным на ней образцом для обработки. (рисунок 1).

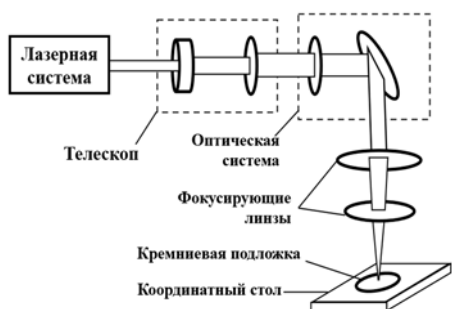


Рисунок 1 – Схема лазерной обработки отверстий в подложке

Наносекундные лазеры с их короткими тепловыми глубинами проникновения в материал подложки и высокими частотами следования импульсов могут обеспечить высокую производительность обработки и значительно уменьшить негативные влияния от высокой тепловой нагрузки и больших температурных градиентов в материале. Преимуществами обработки ультракороткими импульсами лазерного излучения являются отсутствие значительной зоны термического влияния, ударной волны, микротрещин, оплавленных зон и выплесков, теплового повреждения поверхностных слоев материала [1]. Кроме этого, использование лазерного излучения длиной волны 355 нм ультра-фиолетового диапазона позволяет уменьшать диаметр пятна излучения, и следовательно позволяет обрабатывать отверстия диаметром до десятков микрометров.

Для оптимизации процесса производства необходимо промоделировать процесс прошивки

с помощью высокопроизводительного компьютера и соответствующего программного обеспечения. В среде *COMSOL Multiphysics* разработана модель процесса термопередачи при прошивке отверстий в кремниевой подложке толщиной 300 мкм с использованием лазерного излучения в режимах непрерывного и импульсного излучения.

При падении пучка лазерного излучения на поверхность материала часть излучения отражается от нее, а часть проходит вглубь материала, поглощаясь в нем. При моделировании распространение тепловой энергии внутри кремниевой подложки определяется следующим выражением [2]:

$$Q(x, y, z) = Q_0(1-R_c) \cdot \frac{A_c}{\pi r^2} e^{-\left[\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2r^2}\right]} \cdot e^{-A_c z}, \quad (1)$$

где Q_0 – входная энергия лазера, R_c – коэффициент отражения, A_c – коэффициенты поглощения, r – радиус пятна лазера на поверхности подложки, x_0, y_0 – центр подающего луча лазера. Для упрощения процесса моделирования, R_c и A_c для кремния считаются постоянными и температура плавления $T_{пл-Si} = 1415$ °С.

Для моделирования импульсного лазера используются следующие параметры: мощность лазера P равна 3 Вт, длительность импульса $\tau_i = 15$ нс, диаметр луча 30 мкм, длина волны 355 нм. Импульс имеет колоколообразную форму с полой хвостовой частью (таблица 1). Распределение энергии на поверхности подложки в зоне нагрева описывается гауссовским выражением.

Таблица 1 – Параметры лазерного излучения

Режим работы	Импульсный	Непрерывный
Длина волны излучения λ , нм	355	1064
Диаметр d_0 , мм	0,03	1
Мощность лазерного излучения, Вт	3	30
Длительность импульса τ_i , нс	15	
Частота повторения излучения f_n , кГц	22	–

Моделирование термопрофилей лазерной обработки отверстий в кремниевой пластине с помощью прикладного программного пакета *COMSOL Multiphysics* позволило получить зависимость температуры в пластине от времени воз-

действия лазера (рисунок 2) и ее тепловое распределение на поверхности (рисунок 3).

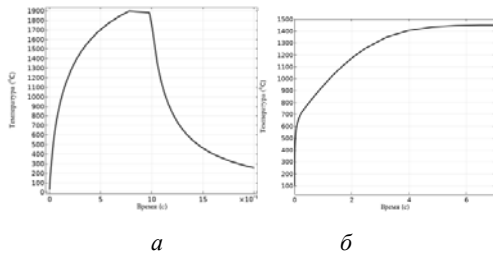


Рисунок 2 – Средняя температура в зоне воздействия импульса (а) и непрерывного лазера (б)

Температура на поверхности пластины, на которую падает лазерное излучение, достигала температуры плавления кремния за 50 с, выделенная пятым контуром от центра (рисунок 3). Таким образом формируется отверстие в виде усеченного конуса с коэффициентом конусообразности более 0,62.

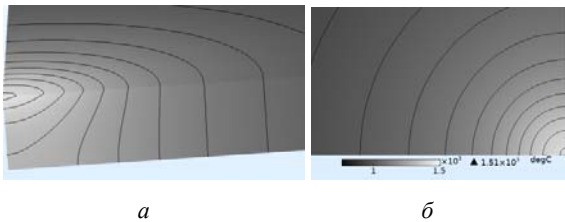


Рисунок 3 – Теплопередача по глубине (а) и на поверхности пластины (б) при использовании непрерывного лазера

В следствие того, что длительность процесса вычисления модели с импульсным лазером сильно зависит от количества импульсов и из-за ограничения шагов вычисления программного обеспечения, проведено моделирование воздействия импульсного лазера с количеством импульсов равным 70. На рисунке 4, а приведена зависимость температуры по толщине подложки от количества импульсов лазера, а на рисунке 4, б – от времени воздействия непрерывного лазера.

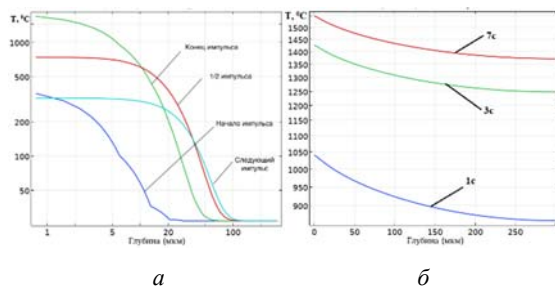


Рисунок 4 – Распределение температуры по толщине подложки импульсного (а) и непрерывного лазеров (б)

В начале воздействия первого пакета импульсов, температура в зоне сфокусированного излучения лазера увеличивается и тепло начинает распространяться внутри пластины. В конце воз-

действия импульса температура на поверхности увеличивается более 1 500 °С, в результате верхний слой подложки расплавляется и удаляется с помощью внешнего обдува, подготавливая зону для поглощения излучения следующего пакета импульсов лазера. В результате моделирования установлено, что температура вне зоны нагрева практически не увеличивается, значит тепло не передается по поверхности подложки (рисунок 5, а). В варианте непрерывного лазера для достижения температуры плавления в зоне нагрева необходимо воздействие лазерным лучом порядка 3 с, при этом практическая температура нагрева составляет около 1 000 °С в области диаметром 20 мм вокруг зоны, формирования отверстия (рисунок 5, б).

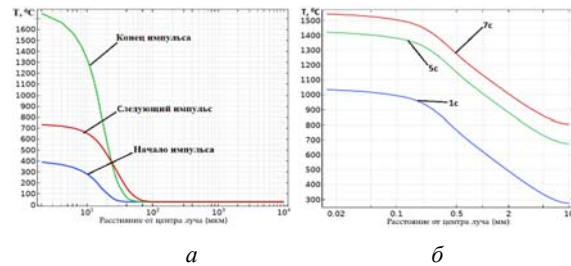


Рисунок 5 – Радиальное распределение температуры в зависимости от количества импульсов

Таким образом, благодаря особенности локального нагрева, использование импульсного лазера дает лучшие результаты защиты поверхности пластины от тепловых эффектов, вызванных локальной высокой температурой. Предполагается, если процесс импульсного разогрева продолжается, то достигается момент, когда зависимость температуры от глубины является практически линейной, которая дает возможность формировать отверстия с формой идеального цилиндра диаметром в несколько десятков микрон.

В результате моделирования сделан вывод, что использование импульсного лазера для обработки отверстий в кремнии дает лучшие результаты тепловой передачи по вертикальной оси, чем с использованием непрерывного излучения лазера. Причем применение лазера с длиной волны 355 нм ультра-фиолетового излучения дает возможность формировать отверстия, диаметр которых в 30 раз меньше тех, которые сформированы непрерывным излучением лазера.

Литература

1. Вакс Е.Д. Практика прецизионной лазерной обработки / Е.Д. Вакс, М.Н. Миленский Л.Г. Сапрыкин. – Москва: Техносфера, 2013. – 696 с.
2. Yang S.T. Comparing the use of mid-infrared versus far-infrared lasers for mitigating damage growth on fused silica // S.T. Yang, M.J. Matthews, S. Elhadj, D. Cooke, G.M. Guss, V.G. Draggoo, P.J. Wegner. Applied Optics. – 2010. – Vol. 49, no. 14. – P. 2606–2616.

УДК 53.087.5

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ КОМПОНЕНТ ШУМА ПЗС-ДЕТЕКТОРА
Литвинович Г.С., Бручковский И.И.**

*Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Использование ПЗС-детекторов нашло широкое распространение в спектральных приборах. Широкий спектральный диапазон, покрывающий область от ультрафиолета до инфракрасного диапазона, позволяет решать широкий круг задач в области дистанционного зондирования земли и мониторинга подстилающих поверхностей. Однако, проводя измерения, например, с авиационной платформы при помощи спектрометра, требуется получить данные с максимальным отношением сигнал/шум за минимальное время экспозиции для уменьшения смаза изображения, что требует информацию о шумовой компоненте, вносящей вклад в результирующий сигнал.

В настоящей работе использована методика [1] и результаты оценки различных компонент шума неохлаждаемой ПЗС-линейки TCD1304DG фирмы Toshiba. Данный датчик популярен среди бюджетных спектрометров на видимую область спектра (350–1 000 нм). Детектор имеет 3 648 рабочих пикселя и 13 конструктивно затемненных пикселей. Сигнал с ПЗС-линейки считывается с частотой 250 кГц и оцифровывается с 12-битным разрешением. Экспозиция изменяется в диапазоне от 15 до 2000 мс. В работе рассматриваются следующие виды шумов: структурный, шум считывания, электронный дробовый шум и фотонный шум, приводятся результаты оценки уровня компонент шума для температуры детектора в 25 °С.

Наличие у детектора конструктивно изолированных от света пикселей позволяет вычитать сигнал, образованный тепловой генерацией электронов.

Сигнал каждого пикселя детектора может быть представлен в следующем виде:

$$N=I \cdot K+Ph(I)+FPN(T,t)+D(T,t)+R(T), \quad (1)$$

где N – сигнал на выходе АЦП электрической схемы детектора; I – освещенность пикселя; K – коэффициент чувствительности пикселя к излучению; Ph – фотонный дробовый шум; FPN – структурный шум; D – электронный дробовый шум; R – шум считывания.

Структурный шум проявляется как шум определенного пространственного рисунка и вызван различиями чувствительности отдельных пикселей детектора. Для определения среднеквадратичного отклонения (СКО) структурного шума проводился следующий эксперимент. Регистровалась серия из $K=100$ изображений при отсутствии света с временами экспозиции от

15 мс до 2 000 мс. Поскольку электронный шум и шум считывания подчиняются нормальному распределению и принимают случайное значение от измерения к измерению, то усреднение выборки изображений на каждой экспозиции позволяет выделить постоянный рисунок на изображении, определяемый структурным шумом. Оценка СКО структурного шума может быть аппроксимирована линейной функцией (рисунок 1) вида $\sigma_{FPN} = 0,00382 \cdot t$, где t – время экспозиции, мс.

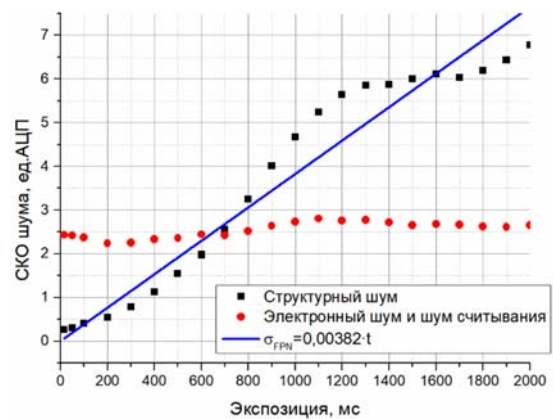


Рисунок 1 – Зависимость компонент шума от времени экспозиции

Электронный дробовый шум и шум считывания определялись из зависимости от времени экспозиции среднего значения всех СКО пикселей по серии из $K=100$ изображений. Так как шум считывания обусловлен особенностями электронной схемы и не зависит от времени экспозиции, то он оценивался как сигнал, полученный с детектора при нулевой экспозиции. Для реального детектора обеспечить нулевое время экспозиции не представляется возможным, поэтому оценка шума считывания получалась при помощи аппроксимации зависимости СКО шума считывания и СКО электронного шума (рисунок 1) до нулевого времени экспозиции. Сумма СКО электронного дробового шума и шума считывания является достаточно пологой. Это означает, что сумма СКО указанных компонент шума ограничена шумом считывания. Для данной температуры СКО шума считывания составляет $\sigma_R = 2,55$ единицы АЦП. Стоит отметить, что при $t > 700$ мс структурный шум начинает преобладать над шумом считывания.

Фотонный шум вызван неравномерным попаданием фотонов на пиксель детектора, соответствующая вероятность описывается распределе-

нием Пуассона [2], согласно которому СКО фотонного шума равно квадратному корню из числа сигнальных электронов N . Для оценки величины фотонного шума регистрировался сигнал различной интенсивности в пределах динамического диапазона детектора для времени экспозиции 200 мс, которая была выбрана из соображений небольшого вклада уже определенных компонент шума и уровня сигнала, занимающего весь динамический диапазон детектора. С использованием экспериментальных данных, представленных на рисунке 2, зависимость величины СКО фотонного шума от уровня сигнала определялась по формуле: $\sigma_{ph}(N) = 0.07 \cdot \sqrt{N}$. При линейном увеличении уровня сигнала уровень фотонного шума возрастает пропорционально \sqrt{N} , следовательно, отношение сигнал/шум возрастает пропорционально \sqrt{N} . То есть при проведении измерений с целью минимизации вклада фотонного шума, имеет смысл регистрировать максимальные уровни сигнала в пределах области линейности детектора.

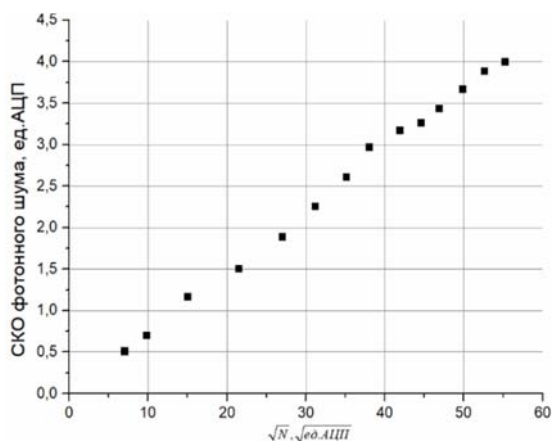


Рисунок 2 – Зависимость СКО фотонного шума от уровня сигнала

Схожие исследования были проведены для температуры детектора 35 °С, что примерно соответствует температуре детектора спектрометра, находящимся под прямыми солнечными лучами на широтах Беларуси в летнее время: при повышении температуры наблюдается рост всех видов шумов. Однако именно структурный шум требует особого внимания, поскольку не может быть устранен усреднением спектров. Для такой температуры на временах экспозиции более 100 мс структурный шум преобладает над остальными видами шума.

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для уменьшения влияния фотонного шума, требуется выбирать максимально возможный уровень сигнала в пределах области линейности детектора.
2. Для уменьшения вклада структурного шума в сигнал стоит использовать небольшие времена экспозиции (менее 260 мс при температуре детектора 25 °С).
3. Для устранения влияния структурного шума производить вычитание темнового сигнала, зарегистрированного при отсутствии излучения на той же экспозиции, что и полезный сигнал.
4. Для возможной коррекции температурных эффектов применять датчик температуры.
5. При необходимости регистрации слабых сигналов на длительных временах экспозиции имеет смысл проводить регистрацию сигнала следующим образом: суммировать несколько изображений на временах экспозиции менее 100 мс. Такой подход позволяет уменьшить компоненту структурного шума до величины меньшей, чем шаг оцифровки сигнала.

Существуют методы цифровой фильтрации сигнала от шума на основе, например, Фурье-фильтров низких частот. Однако учитывая зависимость амплитуды шума от внешних факторов (температуры, время экспозиции), для каждого режима измерений приходится подбирать параметры соответствующего фильтра нижних частот, что представляется достаточно трудоемкой задачей. Априорные знания о величине каждой компоненты шума для заданных условий регистрации позволяет разработать оптимальный фильтр конкретно для данных условий и решаемой задачи.

Компоненты шума, которые были определены экспериментально, позволяют устанавливать оптимальные параметры съемки для различных условий измерений и уже на этапе планирования эксперимента установить желаемые параметры измерения, позволяющие получить максимальное отношение сигнал/шум.

Литература

1. Irie K. A Technique for Evaluation of CCD Video-Camera Noise / K. Irie, A.E. McKinnon, K. Unsworth, I.M. Woodhead // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2008. – Vol. 18, iss. 2. – P. 280–284.
2. Irie K. A model for measurement of noise in CCD digital-video cameras / K. Irie, A.E. McKinnon, K. Unsworth, I.M. Woodhead // Measurement Science and Technology. – 2008. – Vol. 19. – № 4. – P. 1–5.
3. A. Ferrero. Low-uncertainty absolute radiometric calibration of a CCD / Ferrero A., Campos J., Pons A. – Metrologia. – 2006. – Vol. 43. – № 2. – P. 17–21.

УДК 535.253; 53.087.4

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ БАЗОВЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВИДОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ

Залесский В.Б., Малютина-Бронская В.В., Сорока С.А., Ермаков О.В.,
Гребенщиков О.А., Леонова Т.Р.

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Минск, Республика Беларусь

Введение. В последнее десятилетие фотоэлектроника быстро развивается, появляются быстродействующие и многоспектральные матричные, и другие фотоприемные устройства (ФПУ), лавинные фотоприемные модули, «высокотемпературные» фотоприемники с рабочей температурой охлаждения фоточувствительного слоя значительно выше температуры жидкого азота, фотодетекторы регистрации слабых оптических сигналов, в том числе на новых физических принципах и другие. В свою очередь, среди оптоэлектронных приборов фотоприемники, в частности, фотодиоды (ФД), используются для широкого круга применений - от телекоммуникаций до прецизионных измерений в области оптической радиометрии.

Таким образом, указанные тенденции задают специфические требования к используемым ФПУ, для обеспечения определения характеристик которых необходимо специализированное измерительное оборудование с расширенными функциональными возможностями в соответствии с требованиями их исследований, разработки и тестирования.

И одной из важных задач разработчиков и производителей ФПУ является комплексное измерение основных оптических и электрических параметров и характеристик прибора и возможности анализа полученных данных.

Целью данной работы было в одном комплексе соединить основные методики, используемые для измерения и оценки параметров и характеристик ФПУ различного типа, в том числе различного корпусного исполнения, спектрального диапазона и других.

Состав автоматизированного комплекса.

Исходя из поставленной цели в создание комплекса лег модульный подход. Испытательный комплекс состоит из унифицированных модулей, которые могут позволить без дополнительных материальных затрат макетировать различные структурные схемы оптоэлектронных устройств и обеспечивать их наилучшие характеристики путем оптимизации отдельных параметров унифицированных модулей в зависимости от характеристик применяемых ФПУ. Схема автоматизированного базового лазерного испытательного комплекса для ФПУ представлена на рисунке 1.

Оптический модуль (ОМ) включает в себя модуль позиционирования (МП) для размещения испытуемого ФПУ, лазерный источник излучения (ЛИИ), состоящий из мультиспектрального источника лазерного излучения (МСИЛИ) с длиной-ми волн в диапазоне от 405 до 1100 нм на базе полупроводниковых лазеров типа LDI с одинаковой мощностью излучения для измерения абсолютной спектральной чувствительности, импульсные источники лазерного излучения с длинами волн 405 нм, 550 нм и 900 нм. В состав данного модуля так же входит двухкоординатный стол для проведения исследований равномерности фотоэлектрических параметров по площади фотоприемника.

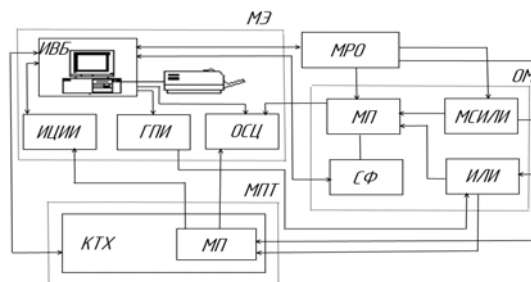


Рисунок 1 – Схема автоматизированного базового лазерного комплекса для тестирования фотоприемников:

МРО – место рабочее оператора; МЭ – модуль электроники (ИВЦ – информационно-вычислительный блок; ИЦИИ – интерактивный цифровой источник-измеритель; ГПИ – генератор произвольного импульса, ОСЦ – осциллограф); ОМ – оптический модуль (МП – модуль позиционирования; МСИЛИ – мультиспектральный источник лазерного излучения; ИЛИ – импульсный источник лазерного излучения); МПТ – модуль позиционирования и темостатирования (КТХ – камера тепла и холода; МП – модуль позиционирования)

МСИЛИ с длинами волн в диапазоне от 405 нм до 1100 нм на базе полупроводниковых лазеров типа LDI представляет собой 9 лазерных диодов с длинами волн 405, 450, 520, 660, 780, 808, 905, 980 и 1064 нм с общим оптоволоконным выводом и с платами управления. Для питания лазерных диодных модулей используются модули управления со стабилизацией тока накачки и температуры лазерных диодов. Для отвода выделяющейся теплоты лазерные диодные модули крепятся к внешнему радиатору.

Оптические волокна от 9 лазерных диодов собраны в оптическом комбайнере в выходном разъеме. Центры волокон располагаются в пределах окружности диаметром 600 мкм. Оптические волокна являются одномодовыми для соответствующих длин волн оптического излучения и выходное излучение имеет профиль близкий к гауссовому.

Спектрофотометр (СФ) предназначен для проведения измерений для измерения относительной и абсолютной спектральной чувствительности фотоприемных устройств.

Метод измерения спектральной чувствительности ФПУ основан на сравнении спектральных чувствительностей исследуемого ФПУ с опорным приемником излучения, относительная и абсолютная спектральная чувствительность которого известна.

Модуль термостатирования и позиционирования (МТП) состоит из камеры тепла и холода (КХТ) для обеспечения измерений в диапазоне температур от минус 60°C до + 60 °C и модуля позиционирования (МП). МТП предназначен для создания определенных температурных условий при измерении фотоэлектрических параметров. МП предназначена для размещения испытуемого объекта (ФПУ) внутри камеры тепла и холода и его позиционирования относительно оптического излучения подаваемого с ОМ. С помощью разработанного МП происходит соосное согласование ФПУ и источника излучения. Система позиционирования встроена в дверцу КХТ.

Модуль электроники (МЭ) предназначен для подачи на испытуемый ФПУ контрольного напряжения заданной амплитуды, длительности и формы импульса, регистрации выходного фототока фотоприемника, обработки сигналов, обеспечения синхронности измерений, анализа переходных и шумовых характеристик фотоприемника, контроля температуры фотоприемника, автоматического расчета эксплуатационных характеристик фотоприемника – темнового тока, фототока, уровня шумов – шум-фактора, коэффициента умножения.

В состав модуля электроники входит: ИВЦ-информационно-вычислительный блок, ИЦИИ-интерактивный цифровой источник-измеритель, ГПИ- генератор произвольного импульса, ОСЦ-осциллограф. ИЦИИ – это калибратор-измеритель напряжения и силы тока и предназначен для воспроизведения и измерения напряжения и силы постоянного тока, а так же для измерения сопротивления. ГПИ предназначен для формирования сигнала и управления источниками излучения подаваемого на ФПУ (возможность задавать частоту, длительность и фор-

му сигнала от ИЛИ). ОСЦ предназначен для измерения характеристик выходного сигнала с ФПУ и контроля формируемого сигнала ГПИ.

ИВЦ обеспечивает управление комплексом с помощью персонального компьютера для визуализации, обработки и передачи результатов измерений в локальной компьютерной сети. Для комплекса возможно использование как стандартного программного обеспечения (ПО), поставляемое с измерительными приборами, так и разработанного ПО.

Параметры комплекса (рисунок 2):

- Спектральный диапазон возбуждающего излучения: от 405 до 1060 нм;
- Диапазон измерения токов: от 10^{-10} до 2 А;
- Диапазон напряжения на фотоприемнике: от 10^{-6} до 500 В;
- Диапазон частоты подаваемых импульсов оптического излучения: от 0 до 500 МГц.

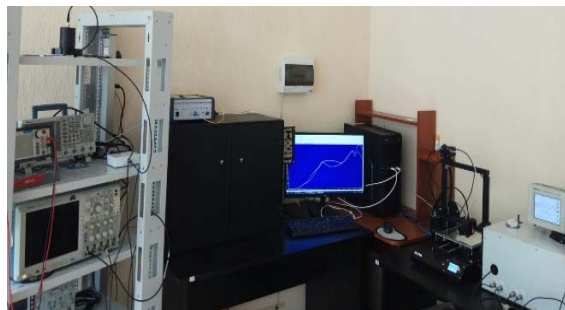


Рисунок 2 – Внешний вид автоматизированного базового лазерного комплекса для тестирования фотоприемников

Методики измерения параметров разработаны в соответствии с ГОСТ-17772-88 «Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства».

Данный комплекс имеет свидетельство о метрологической аттестации БелГим.

Вывод. Автоматизированный лазерный испытательный комплекс позволит испытывать все основные параметры ФПУ под действием лазерного излучения видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов спектра в соответствии с существующими стандартами, а автоматизация и модульное исполнение комплекса позволяет сократить время испытаний ФПУ, эффективно оценивать параметры разрабатываемых приборов, что является актуальным для обеспечения конкурентоспособности отечественной оптоэлектронной базы.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания 1.10 подпрограммы «Уникальное научное оборудование» ГНТП «Эталонные научные приборы».

УДК 53.087.92

КРЕМНИЕВЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ С ВНУТРЕННИМ УСИЛЕНИЕМ ШИРОКОГО СПЕКТРА ПРИМЕНЕНИЯ

Сорока С.А.¹, Залесский В.Б.¹, Малютина-Бронская В.В.¹, Лемешевская А.М.², Солодуха В.В.²

¹ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Минск, Республика Беларусь

²Филиал Научно-технический центр «Белмикросистемы»
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга ИНТЕГРАЛ
Минск, Республика Беларусь

Введение. В последние годы в мире возрос интерес к разработке приборов, включающих оптоэлектронные компоненты. В технических приложениях (атомная энергетика, астрономия, оптика и др.) существует необходимость регистрации и детектирования очень слабых световых потоков малой интенсивности. Один из таких приборов являются оптические детекторы на эффекте лавинного умножения [1–2]. Лавинные фотодетекторы или фотодиоды (ЛФД) обеспечивают внутреннее усиление регистрируемого сигнала в объеме полупроводника в $50 \div 1000$ раз.

Лавинные мультипиксельные фотодиоды или кремниевые фотоумножители (SiФЭУ) в настоящее время являются быстро развивающимся и очень перспективным классом фотодетекторов, который становится основой для решения широкого круга научных и прикладных задач, требующих регистрации импульсного излучения малой интенсивности. Характеристики современных детекторов позволяют не только заменять вакуумные ФЭУ во многих применениях, но и создавать на их основе качественно новые системы, содержащие тысячи каналов регистрации.

Отличительными особенностями приборов данного типа являются компактные размеры, высокая чувствительность даже к малым световым сигналам, хорошая квантовая эффективность и низкая стоимость.

Области применения ЛФД: оптическая локация и дальнометрия, регистрация ионизирующих излучений, ядерная физика, медицинские приборы. SiФЭУ находят применение в различных областях промышленности, научных исследованиях и телекоммуникациях, таких как квантовая криптография, астрономические ЛИДАРы.

В данной работе представлены два перспективных типа оптических детекторов – лавинный фотодиод (ЛФД) и кремниевый фотоумножитель (SiФЭУ), разработанные ОАО «ИНТЕГРАЛ» совместно с ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника».

Лавинный фотодиод. ЛФД разработанные на ОАО «ИНТЕГРАЛ» имеют: высокое отношение сигнал/шум; высокую обнаружительную способность; низкую цену при конкурентных характеристиках (характеристики разработанных ЛФД соответствуют характеристикам лучших зарубежных аналогов); спектральный диапазон

чувствительности: 0,35–1,06 мкм. Аналогов данному прибору в СНГ нет.

Разработанные приборы имеют диаметр активной области 200 мкм, 500 мкм и 1 000 мкм. Есть две группы приборов по пробивным напряжениям – 200–450 В и 140–200 В. На рисунке 1 показан внешний вид и спектральная чувствительность ЛФД S (А/Вт), приведенная к единице падающей мощности.

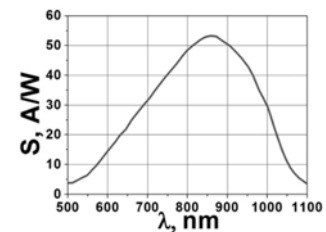
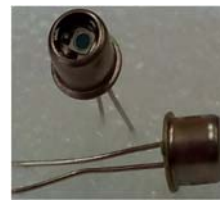


Рисунок 1 – Внешний вид ЛФД в корпусе КТ-1-7 и спектральная чувствительность ЛФД

Максимум спектральной чувствительности разработанных ЛФД находится в области $\lambda = 830$ нм и составляет $S = 0,26$ А/Вт при нулевом смещении. В предпробойном режиме при напряжении смещения 230–250 В чувствительность S может достигать значений 60–100 А/Вт (для прибора с диаметром светочувствительной области 500 мкм). В таблице 1 представлены основные параметры ЛФД с максимальным размером светочувствительной области.

Таблица 1 – Основные параметры ЛФД КОФ101 и КОФ 102

Наименование параметра, буквенное обозначение, единица измерения, режим измерения	Маркировка ЛФД КОФ	
	101А	102В
Напряжение лавинного пробоя, U_b , В, при $I_b = 100$ мкА	200–450	140–200
Максимальный темновой ток, I_d , А, при $U = 0,1U_b$	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$
Диапазон спектральной фоточувствительности, λ , мкм, при $U = 0; 0,9U_b$ В	0,4–1,1	0,4–1,1
Коэффициент умножения, M, при $U = 0,9U_b$	30–100	30–60

Кремниевые фотоумножители работающие в гейгеровском режиме. SiФЭУ представляет собой матрицу ячеек, каждая из которых пред-

ставляет собой ЛФД и включенный последовательно с ним резистор с сопротивлением от 0,2 до 10 Мом (рисунок 2, а). Все ячейки матрицы соединены параллельно. В зависимости от применения количество отдельных ЛФД в матрице может меняться от нескольких единиц до нескольких десятков тысяч, а площадь единичного ЛФД может быть от 100 мкм² до 10 000 мкм² и более.

На рисунке 2, б показан внешний вид SiФЭУ. Он имеет рабочую площадь от 1 мм² до 10 мм² и может состоять из 100–10 000 пикселей (размером от 10×10 мкм до 50×50 мкм), каждый из которых представляет собой кремниевый ЛФД. Для уменьшения оптической и электрической связи пиксели отделены друг от друга узкими металлизированными канавками.

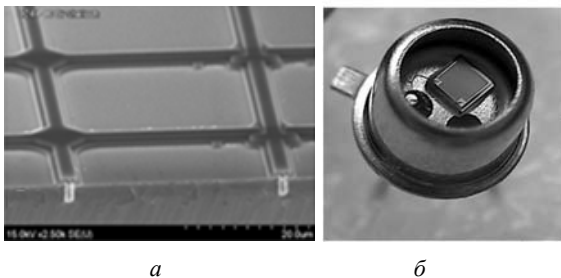


Рисунок 2 – Внешний вид многопиксельной матрицы SiФЭУ (а) и внешний вид SiФЭУ (б)

Основные достоинства SiФЭУ: высокое внутреннее усиление порядка 10^6 ; малый разброс коэффициента усиления (около 10 %); невысокая чувствительность коэффициента усиления к изменению температуры и напряжения питания; эффективность регистрации видимого света на уровне вакуумных ФЭУ; возможность работы, как в режиме счета импульсов, так и в токовом режиме; хорошее временное разрешение (десятки пикосекунд); невысокое напряжение питания (25–60 В); нечувствительность к магнитному полю; компактность (размеры кристалла порядка $2 \times 2 \times 0,3$ мм).

Получены и исследованы опытные образцы SiФЭУ с размером приемной ячейки 35×35 мкм и количеством приемных ячеек в матрице 1 004 шт.

Основные параметры опытных образцов следующие:

1. Коэффициент усиления линейно увеличивался с ростом напряжения питания в диапазоне перенапряжений от 1 до 5 В и при перенапряжении 3 В составил 10^6 .

2. Темновой счет на опытных образцах изменялся от 20 до 80 кГц при изменении перенапряжения от 1 до 5 В. При уменьшении температуры до -15 °С темновой счет уменьшался в 5 раз.

3. Величина перекрестной оптической помехи составила 7–10 %.

4. Диапазон спектральной чувствительности составляет 380–900 нм с максимумом спектральной чувствительности на длине волны 500 нм и составляет 230 000 А/Вт. для перенапряжения 4 В (рисунок 3).

5. Эффективность регистрации фотонов при перенапряжении 4 В изменяется от 25 % до 5 % в диапазоне длин волн 380–900 нм и имеет максимум в 40% на длине волны 500 нм.

Полученные опытные образцы SiФЭУ по основным параметрам не уступают конструктивно схожим образцам фирмы SiФЭУ Hamamatsu.

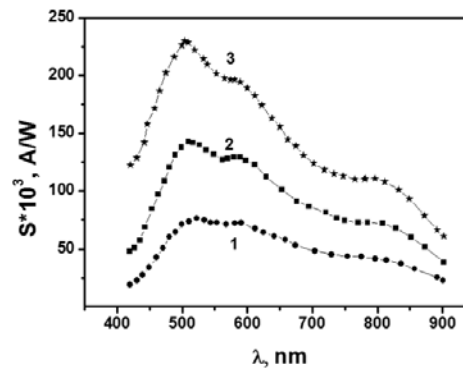


Рисунок 3 – Спектральная чувствительность SiФЭУ для значений перенапряжения 2 В, 3 В, 4 В

Интегральная спектральная чувствительность ЛФД больше (80 %), чем интегральная спектральная чувствительность Si-ФЭУ (40 %), диапазоны спектральной чувствительности хорошо совпадают со спектром излучения сцинтиллятора для обоих типов приборов.

Заключение. В настоящее время ОАО «ИНТЕГРАЛ» серийно выпускают на ОАО «ИНТЕГРАЛ» ЛФД четырех типонаименований и проводят совместную разработку с ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» линейки SiФЭУ с размерами единичной ячейки 35×35 мкм и 50×50 мкм и различными количествами ЛФД в матрице.

В ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» проводятся работы по разработке детекторов ионизирующих излучений на базе данных оптических датчиков.

Благодарности. Работа по Si-ФЭУ выполнена при финансовой поддержке Задания 2.3.4.1 программы союзного государства «Технология-СТ».

Литература

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
2. Залесский В.Б., Малышев В.С., Хатько В.В. Исследование характеристик лавинных фотодиодов с охраняемыми областями // Материалы 2-ой Международной конференции «Приборостроение-2009», Минск, Республика Беларусь, 11–13 ноября 2009 г.

УДК 539.233 + 691.175.5/8

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ
ТОНКИХ ПЛЕНОК ПОЛИ(9-ВИНИЛКАРБАЗОЛА)Мельникова Г.Б.¹, Лапицкая В.А.^{1,2}, Петровская А.С.¹, Акулова В.М.³, Толстая Т.Н.¹,
Кузнецова Т.А.^{1,2}, Котов Д.А.⁴, Чижик С.А.^{1,2}¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь³Институт химии новых материалов НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь⁴Белорусский государственные университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Введение. Установление фундаментальных закономерностей формирования наноразмерных полимерных пленок, мембран и мультислойных структур позволяет разрабатывать нанометровые покрытия с уникальными деформационно-прочностными, магнитными, электропроводящими, гидрофильными, гидрофобными, флуоресцирующими, каталитическими, антибактериальными, противоопухолевыми, оптическими и другими полезными свойствами. Одними из перспективных полимеров являются поли-9-винилкарбазол (ПВК) и его аналоги [1]. С использованием технологии Ленгмюра – Блоджетт (ЛБ) возможно воспроизводимо получать молекулярные моно- и мультислой на основе органических веществ, включая и высокомолекулярные соединения. Преимуществом используемого горизонтального способа выделения пленок на планарную пористую подложку путем понижения уровня субфазы является получение более упорядоченных мономолекулярных слоев полимерных соединений.

Материалы и методы исследования. Предварительная очистка подложек кремния и предметного стекла проводилась в плазме диэлектрического барьерного разряда (ПДБР) в течение 1 мин. Мощность источника плазмы: 10–30 Вт. Расстояние от источника до образца 20 мм [2]. Затем на очищенных поверхностях кремния и стекла формировали полимерные монослои из растворов ПВК (пол-9-винилкарбазол, Sigma-Aldrich, M_r ~1 100 000) в хлороформе с концентрациями 0,25 мг/мл методом спин-коатинга (скорость вращения 2700 rpm в течение 2 мин) и 0,5 мг/мл ЛБ-методом при поверхностном давлении формирования 35 мН/м на «Автоматизированном комплексе для модифицирования поверхностей мембран молекулярными и ультратонкими слоями» (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Беларусь).

Исследования структуры и распределения значений сил адгезии по поверхности монослоев проводили на АСМ Dimension FastScan (Bruker, США) в режиме PeakForce Tapping QNM

с использованием стандартных кремниевых кантилеверов типа NSC 11 («Mikromasch», Эстония) с радиусом закругления острия 10 нм и жесткостью консоли 4,613 Н/м.

Гидрофильные свойства поверхности определяли на основании измеренных краевых углов смачивания на установке DSA 100E (KRUSS, Германия). Контактный угол определяли методом лежащей капли на основании построения касательной в трехфазной точке: жидкость – подложка – воздух.

Результаты исследования. На первом этапе исследования было оценено изменение свойств подложек из кремния и стекла, обработанных ПДБР и дистиллированной водой, так как формирование слоев ПВК методом ЛБ происходит с водной субфазы. Установлено, что дополнительная обработка дистиллированной водой позволяет снизить краевой угол смачивания образцов с 56° до 45°, тем самым увеличить гидрофильность поверхности, и, следовательно, адгезию пленки к поверхности подложки. Образуются четко выраженные сферообразные структуры, значения среднеквадратичной шероховатости поверхности возрастают (от 2,1 до 3,1 нм), что свидетельствует об увеличении неоднородности системы.

Методом АСМ установлено, что толщина всех сформированных пленок ПВК составила 10 нм. Покрытие ПВК на подложке из кремния, сформированное методом ЛБ, представляет собой связанные неоднородные по форме и размерам гранулы размером от 100 до 200 нм (рисунок 1). На предметном стекле ЛБ-покрытия более однородные ($R_a = 0,521$ нм, $R_q = 0,678$ нм), чем на кремниевых подложках ($R_a = 2,67$ нм, $R_q = 3,15$ нм). Однако это может быть связано с неоднородностью поверхности стеклянной подложки, и, соответственно, заполнению неровностей стекла полимерными глобулами.

Методом спин-коатинга формируется более однородное покрытие с четко сформированными кольцами диаметром 100 нм по всей поверхности пленки, однако на стекле покрытие неоднородно (рисунок 2), что приводит к значительному уменьшению краевого угла смачивания (до

67,7°) по сравнению с другими образцами. В соответствии с данными шероховатости полимерных покрытий на кремнии, полученных методом спин-коатинга, формируются более однородные пленки, чем на стекле (таблица).

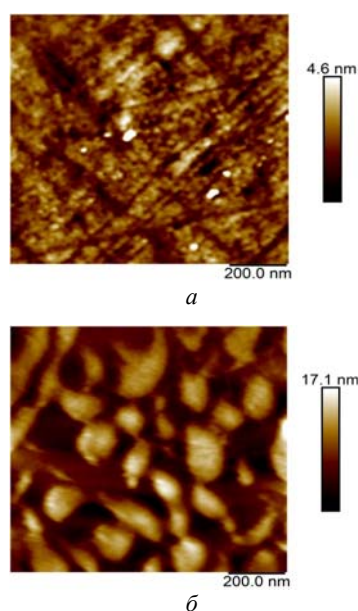


Рисунок 1 – АСМ-изображения поверхности пленки ПВК, сформированных методом ЛБ, на подложках из стекла (а) и кремния (б)

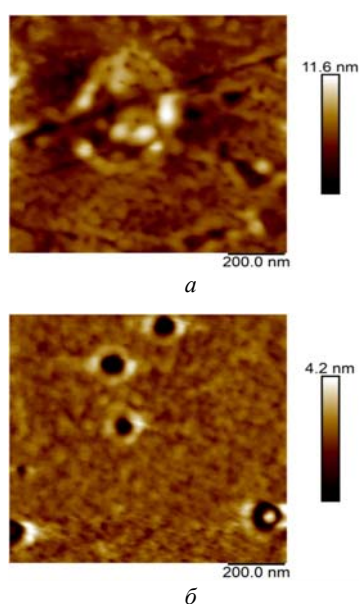


Рисунок 2 – АСМ-изображения поверхности пленки ПВК, сформированных методом спин-коатинга, на подложках из стекла (а) и кремния (б)

Краевой угол смачивания для образцов ПВК на кремнии выше 90° , что является положительным для изучения адсорбционных свойств газовых систем (таблица 1).

Таблица 1 – Значения среднеарифметической (R_a), среднеквадратичной (R_q) шероховатости, силы адгезии (F_a), краевого угла смачивания (КУС) пленок ПВК на стекле и кремнии

Образец	R_a , нм	R_q , нм	F_a , нН	КУС, вода
ПВК/стекло, ЛБ	0,521	0,678	36,1	86,6
ПВК/Si, ЛБ	2,67	3,15	23,6	94,7
ПВК/стекло, спин-коатинг	1,06	1,45	79,8	67,7
ПВК/Si, спин-коатинг	0,27	0,43	52,5	92,3

Наибольшие значения силы адгезии характерны для пленок из ПВК на стекле, сформированных методом спин-коатинга, а также наименьшее значение КУС, что свидетельствует о гидрофильных свойствах поверхности.

Исследование было выполнено в рамках задания 2.82 Энергетические системы, процессы и технологии», ГПНИ «Энергетические системы, процессы и технологии» подпрограмма 2 «Эффективные теплофизические процессы и технологии».

Заключение. В результате проведенных исследований показано влияние структуры подложек, обработанных ПДБР, и метода формирования на морфологию и адгезионные свойства пленок ПВК. Сформированные гидрофобные поверхности ПВК на кремнии методами спин-коатинга и ЛБ являются гидрофобными и могут быть рекомендованы в сенсорных устройствах для анализа питьевой воды на содержание органических компонентов.

Литература

1. Anca Giorgiana Grigoras A Review on Medical Applications of Poly(Nvinylcarbazole) and Its Derivatives / Anca Giorgiana Grigoras // International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials. – 2016 1563-535X
2. Lapitskaya V.A. [et al.] The Changes in Particle Distribution Over the Polymer Surface Under the Dielectric Barrier Discharge Plasma / V.A. Lapitskaya [et al.] // International Journal of Nanoscience Vol. 18, No. 03n04, 1940079 (2019) Part 2: Nanotechnology DOI: 10.1142/S0219581X19400799

О ДОПЛЕРОВСКОМ КОНТУРЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ
Невдах В.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Известно, что спектральные линии излучения молекул (атомов) разреженного газа являются неоднородно уширенными. При регистрации этих линий частицы газа, из-за их теплового движения, можно рассматривать как источники излучения, хаотически движущиеся со своей скоростью и под своим углом к направлению на приемник. Вследствие действия эффекта Доплера приемник регистрирует излучение от этих движущихся источников с разными частотами ν , отличными от частоты излучения ν_0 , соответствующей квантовому переходу в источниках. Суперпозиция излучений от таких хаотически движущихся источников и образует спектральную линию разреженного газа, имеющую неоднородный или доплеровский контур, который в физической литературе принято описывать формулой (например, [1])

$$S(\nu) = S_0 \exp\left(-\frac{mc^2(\nu - \nu_0)^2}{2kT\nu_0^2}\right), \quad (1)$$

где S_0 – спектральная плотность интенсивности излучения в центре линии на частоте ν_0 , m – масса молекулы, T – температура газа. Так как формула (1) совпадает с кривой закона распределения Гаусса, то описываемый ею контур спектральной линии называется гауссовым. Из (1) видно, что доплеровский контур спектральной линии симметричен относительно частоты квантового перехода частиц ν_0 , на которую приходится максимальная спектральная интенсивность линии S_0 .

Формула (1) получается из формулы, описывающей эффект Доплера в случае движущегося источника, имеющего проекцию скорости ν_z на направление от источника к приемнику (например, на ось OZ) в нерелятивистском случае $\nu_z \ll c$, где c – скорость света

$$\nu = \nu_0 \left(1 \pm \frac{\nu_z}{c}\right) \quad (2)$$

и функции распределения Максвелла частиц газа по этой проекции скорости частиц (см., например, [2])

$$f(\nu_z) d\nu_z = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \exp\left[-\frac{m\nu_z^2}{2kT}\right] d\nu_z. \quad (3)$$

В то же время из (2) следует, что излучение на частоте ν_0 приемник получает от частиц, для которых $\nu_z = 0$. Это могут быть или неподвиж-

ные частицы, или движущиеся перпендикулярно оси OZ . Однако, согласно распределению Максвелла по скоростям

$$f(\nu) d\nu = 4\pi\nu^2 \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} e^{-\frac{m\nu^2}{2kT}} d\nu, \quad (4)$$

неподвижных частиц ($\nu=0$) в газе при любой отличной от нуля температуре нет, а частицы, движущиеся перпендикулярно направлению на приемник, вследствие поперечного эффекта Доплера, должны давать вклад в спектральную линию на частоте $\nu < \nu_0$.

Следовательно, приводимое в современной физической литературе описание доплеровского контура спектральной линии с использованием формулы (1) является физически некорректным. Некорректность заключается в том, что для описания контура линии используется формула (2) для частного случая эффекта Доплера – продольного эффекта Доплера, и, соответственно, учитывается излучение только от тех частиц газа, которые подчиняются распределению (3) – распределению Максвелла по проекции скорости частиц газа на направление к приемнику излучения.

Цель настоящей работы – дать физически корректное описание неоднородного контура спектральной линии с использованием общей формулы для эффекта Доплера в случае произвольного движения источников излучения и распределения Максвелла этих источников по скоростям (4).

В эффекте Доплера в оптике сравниваются частоты электромагнитного излучения от неподвижного и движущегося источника относительно приемника. Так как по определению частота волны ν это величина обратная периоду волны T , то, очевидно, для определения частоты волны измерение её амплитуды нужно проводить не в один какой-либо момент времени, а в течение интервала времени длительностью не меньше одного периода. Для измерения временных интервалов необходимо иметь меру единицы времени, т. е. часы. И для того, чтобы проводимое в эффекте Доплера сравнение частот электромагнитных волн было физически корректным, нужно чтобы понятия «частота света» и «единица частоты» были одинаковыми как для источника, так и для приемника. Для этого они должны измеряться одинаковыми мерами. Это может быть только в том случае, если время в часах источника и приемника протекает одинаково. В противном случае, в результате измерений будут полу-

чаться частоты, имеющие разные единицы измерения для источника и приемника и их сравнение будет физически некорректным.

Рассмотрим разреженный газ, находящийся в состоянии термодинамического равновесия при температуре T на некотором расстоянии от неподвижного в рассматриваемой системе координат приемника, регистрирующего электромагнитное излучение, испускаемое частицами этого газа. Пусть частицы этого газа имеют излучательный переход на частоте ν_0 и подчиняются распределению Максвелла по скоростям (4). Каждую частицу такого газа будем рассматривать как источник излучения, движущийся со своей постоянной скоростью v и под своим углом φ к направлению на приемник излучения. Пусть в некоторый произвольный момент времени t_1 , когда расстояние между одним таким источником, находящимся в точке А, и приемником, находящимся в точке О, равно l , а создаваемая (испускаемая) им электромагнитная волна имеет максимум. Будем считать, что электромагнитная волна от источника к приемнику распространяется со скоростью света в вакууме c . Очевидно, что приемник зарегистрирует этот максимум волны в момент времени $\theta_1 = t_1 + l/c$.

Пусть следующий максимум электромагнитной волны источник создаст в момент времени $t_2 = t_1 + T_0$, где T_0 – период создаваемой им волны. В этот момент времени источник будет находиться уже в другой точке А' пространства, находящейся на расстоянии $\Delta = v T_0$ от точки А и на расстоянии x от приемника. Следовательно, приемник зарегистрирует второй максимум волны в момент времени $\theta_2 = t_2 + x/c$. Очевидно, что $T = \theta_2 - \theta_1$ – период электромагнитной волны, регистрируемой приемником. Нетрудно получить выражение, связывающее частоту волны $\nu = 1/T$, регистрируемую приемником, с частотой волны $\nu_0 = 1/T_0$ создаваемой источником:

$$\nu = \frac{\nu_0}{1 + \nu_0 \frac{x-l}{c}}. \quad (5)$$

Следует отметить, что формула (5) – это формула для эффекта Доплера в общем случае движущегося источника излучения и неподвижного приемника, и она получена на основе волновых представлений о свете строго, без всяких упрощающих допущений и условий.

Также уместно отметить, что фиксирование моментов времени t_1 и t_2 источником и моментов времени θ_1 и θ_2 приемником может осуществляться с помощью часов, не обязательно идущих синхронно, но для того, чтобы сравнение частот электромагнитных волн, проводимое в формуле (5), было физически корректным, нужно, чтобы время в обоих часах протекало одинаково.

Из выражения (5) следует, что:

1) Не любое движение источника приводит к изменению частоты волны, регистрируемой приемником. Если источник движется так, что $x = l$, то $\nu = \nu_0$ – приемник будет регистрировать излучение с частотой, создаваемой источником.

Отметим, что в этом случае точки нахождения источника в пространстве А и А' в моменты времени t_1 и t_2 создания источником максимумов электромагнитной волны, а также точка положения приемника О образуют равнобедренный треугольник с основанием Δ , сторонами l и одинаковыми углами φ , образуемыми сторонами l и Δ .

2) Если $x > l$, то $\nu < \nu_0$ – приемник будет регистрировать электромагнитную волну с меньшей частотой, чем создает источник.

3) Если, наоборот, $x < l$, то $\nu > \nu_0$ – приемник будет регистрировать электромагнитную волну с большей частотой, чем создает источник.

Так как на приемник попадает излучение от всех частиц газа, движение которых попадает под три рассмотренных случая, то в результате приемник и регистрирует спектральную линию с доплеровским уширением.

Следует подчеркнуть, что все излучение, входящее в состав неоднородно уширенной спектральной линии, в том числе и на частоте $\nu = \nu_0$ – это излучение от движущихся частиц газа. В этом заключается принципиальное отличие предлагаемого объяснения доплеровского контура спектральной линии от существующего.

Для аналитического описания доплеровского контура линии нужно найти связь частоты регистрируемого излучения ν со скоростью движения частиц газа v и параметрами, характеризующими геометрию регистрации. Места нахождения источника и приемника в пространстве в моменты времени t_1 и t_2 создания источником максимумов электромагнитной волны – точки А, А', и О являются вершинами треугольника со сторонами l , x и Δ и углом φ , образуемым сторонами l и Δ . Используя теорему косинусов, находим:

$$x = l \sqrt{1 + \left(\frac{v}{lv_0}\right)^2} - 2 \frac{v}{lv_0} \cos \varphi. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), получаем формулу для эффекта Доплера в общем случае движущегося под произвольным углом φ источника излучения и неподвижного приемника в виде:

$$\nu = \frac{\nu_0}{1 + \frac{lv_0}{c} \left(\sqrt{1 + (v/lv_0)^2} - 2(v/lv_0) \cos \varphi - 1 \right)}. \quad (7)$$

Из формулы (7) видно, что неподвижный детектор регистрирует излучение от движущегося источника на частоте ν , величина которой определяется не только скоростями источника и вол-

ны, но и геометрией расположения источника и приемника в процессе регистрации излучения. Также видно, что в общем случае связь между регистрируемой частотой излучения и скоростью движения источника излучения нелинейная. Из (7) можно наоборот выразить скорость источника через частоту регистрируемого излучения

$$v = \sqrt{l^2 v_0^2 \cos^2 \phi + c^2 v_0^2 \left(\frac{1}{\nu} - \frac{1}{\nu_0} \right)^2 + 2clv_0^2 \left(\frac{1}{\nu} - \frac{1}{\nu_0} \right) + l^2 v_0^2 \cos^2 \phi} + lv_0 \cos \phi \quad (8)$$

Используя (8), нетрудно найти величины v^2 и dv , подставить их в распределение Максвелла (4) и получить выражение для $f(v)dv$, физически корректно описывающее доплеровский контур регистрируемой спектральной линии. Очевидно, что этот контур отличен от гауссового (1). Выражение для контура линии получается достаточно большим и неудобным для анализа, поэтому в настоящей работе не приводится.

Проведем только общий качественный анализ полученного контура в трех случаях, уже упоминавшихся выше. Отметим, что в рассматриваемом разреженном газе, имеющем температуру T , не существует преимущественного направления теплового движения его частиц, т.е. все углы ϕ между векторами скоростей этих частиц и направлением на приемник равновероятны и все частицы газа из рассматриваемого объема дают вклад в регистрируемое приемником излучение.

1. Условию $x = l$, при котором приемник будет регистрировать электромагнитную волну на частоте $\nu = \nu_0$, в формуле (7) соответствует условие равенства нулю выражения в скобках знаменателя. Это может быть только при выполнении условия

$$\cos \phi = \cos \phi_0 = \frac{\Delta}{2l} = \frac{v}{2lv_0}, \quad (9)$$

так как неподвижных частиц в газе нет. Следовательно, излучение на частоте $\nu = \nu_0$ приемник регистрирует от движущихся частиц газа, для которых выполняется условие (9). Ясно, что для конкретной геометрии опыта (заданных l и ν_0), вклад в излучение на частоте ν_0 будут давать частицы газа, имеющие любые значения скоростей в интервале между некоторыми конечными значениями v_{\min} и v_{\max} из распределения (4), вектора которых направлены для каждой скорости под своим углом ϕ_0 из интервала

$$\arccos\left(\frac{v_{\max}}{2lv_0}\right) < \phi_0 < \arccos\left(\frac{v_{\min}}{2lv_0}\right)$$

к направлению на приемник. Отметим, что все эти углы $\phi_0 < \pi/2$, так как в каждом таком случае точки A , A' , и O являются вершинами равнобедренного треугольника.

2. Условию $x > l$, при котором приемник будет регистрировать электромагнитную волну с меньшей частотой, чем создает источник, т.е. с частотой $\nu < \nu_0$, в формуле (7) соответствует случаю, когда выражение в скобках больше нуля. Это будет при:

$$\cos \phi < \frac{\Delta}{2l} \quad \text{или} \quad \phi_0 < \phi \leq \pi. \quad (10)$$

Случай поперечного эффекта Доплера (движение частиц под углом $\phi = \pi/2$) также соответствует условию (9).

3. Условию $x < l$, при котором приемник будет регистрировать электромагнитную волну с большей частотой, чем создает источник, т.е. с частотой $\nu > \nu_0$, в формуле (7) соответствует условию, чтобы выражение в скобках было меньше нуля. Это соответствует условию

$$\cos \phi > \frac{\Delta}{2l} \quad \text{или} \quad 0 \leq \phi < \phi_0. \quad (11)$$

Так как условие (10) выполняется для большего числа частиц газа, чем условие (11), то, очевидно, что реальный доплеровский контур спектральной линии будет несимметричным по интенсивности относительно частоты ν_0 – спектральная плотность интенсивности излучения на частотах $\nu < \nu_0$ будет больше, чем на частотах $\nu > \nu_0$.

Предложено новое физически корректное описание неоднородно уширенного контура спектральных линий с использованием общей формулы для эффекта Доплера в случае произвольного движения источников излучения и неподвижного приемника и распределения Максвелла этих источников по скоростям.

Литература

1. Ахманов С.А. Физическая оптика / С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин. – М.: Изд-во МГУ; Наука, 2004. – 656 с.
2. Физический энциклопедический словарь / гл. ред. А.М. Прохоров. – М.: Советская энциклопедия, 1983. – 928 с.

УДК 621

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ В УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Нестерёнок А.В., Залесский В.Б., Сенькевич Д.В.

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Минск, Республика Беларусь

Введение. При классическом расположении в утреннее и вечернее время на солнечный модуль попадает малое количество солнечного излучения. В то время как при использовании трёхмерных конструкций солнечных модулей увеличивается количество солнечного излучения в утренние и вечерние часы. Это происходит за счёт установки некоторых модулей в конструкции под большими углами к горизонту. Однако основным выигрышем при использовании трёхмерных конструкций является экономия занимаемой площади [1].

Основным источником для теоретических расчётов эффективности солнечных элементов являются базы данных освещённости. Среди общедоступных баз данных наиболее точными являются CM-SAF – PVGIS для Европы и Азии. В данной работе были использованы данные CM-SAF – PVGIS для Европы и Азии, собранные за 12 лет (1998-2005 и 2006-2011) и программное обеспечение, разработанное Joint Research Centre Европейской комиссии, PVGIS project [2].

Цель исследования: определить влияние степени пространственной ориентации CM на эффективность работы конструкции с учетом временных, географических и климатических факторов, на примере условий Республики Беларусь (РБ).

Исходные данные для моделирования. Для расчёта были выбраны солнечные модули, созданные на основе кристаллического кремния мощностью 1 кВт с потерями в системе 14 % и площадью 4 м², как наиболее распространённые на рынке на сегодняшний день [3]. Суммарная занимаемая площадь при классическом расположении 10 таких модулей будет равна 32,36 м², 13 модулей – 42,07 м². Площадь, занимаемая конструкцией, состоящей из 10 солнечных модулей, предложенной на рисунке 1 – 11,13 м². Также была рассчитана конструкция трехмерного расположения солнечных модулей на фасаде Национальной библиотеки Республики Беларусь (рисунок 2), а именно южная его часть – для такой конструкции необходимо 13 солнечных модулей, а суммарная занимаемая площадь такой конструкции 21,14 м². Для сравнения вырабатываемой энергии с учётом занимаемой площади была рассчитана вырабатываемая конструкцией энергия на единицу площади (удельная вырабатываемая энергия). Расположение солнечных элементов на гранях Национальной библиотеки Республики Беларусь предложено с целью показать

возможности применения трёхмерных конструкций солнечных модулей на примере существующего объекта.



Рисунок 1 – Конструкция 1



Рисунок 2 – Конструкция, расположенная на каркасе Национальной библиотеки Республики Беларусь

В используемом ПО для расчёта используются данные освещённости выбранной географической области. Программное обеспечение в своей основе использует следующую формулу расчёта вырабатываемой мощности:

$$W = \frac{kEP_w}{1000}, \quad (1)$$

где E – значение инсоляции за выбранный период; k – коэффициент, берущий во внимание нагрев солнечных панелей на солнце, а также угол падения в течение дня; P_w – мощность солнечного модуля.

Таким образом в нашем случае формула 1 примет следующий вид [4]:

$$W = kE \quad (2)$$

В данном ПО поправочный коэффициент берётся исходя из температурных данных индивидуально для каждого месяца года.

Результаты моделирования. На основании проведенного сравнения результатов моделирования вырабатываемой энергии солнечными модулями для трёх исследуемых регионов Республики Беларусь (рисунок 4–7), было установлено, что предложенная конструкция (рисунок 1), занимающая существенно меньшую площадь в сравнении с классическим вариантом размещения, выигрывает в удельной вырабатываемой энергии. Также была показана возможность практического применения трёхмерных солнечных конструкция солнечного модуля, состоящего из 13 солнечных элементов расположенного на фасаде национальной библиотеки (рисунок 2). Как и в предыдущем случае, выигрыш в удельной вырабатываемой энергии является значительным преимуществом перед классическим вариантом расположения.

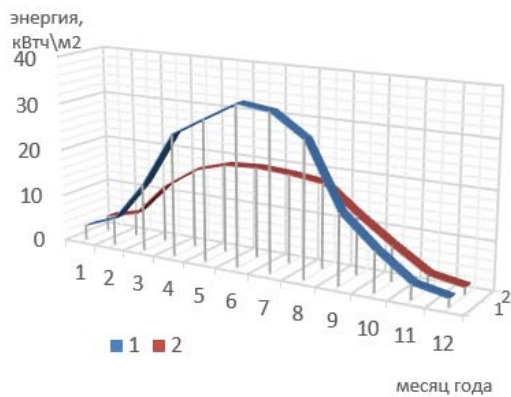


Рисунок 4 – Удельная вырабатываемая энергия: 1 – конструкцией на фасаде Национальной библиотеки, 2 – при классическом расположении

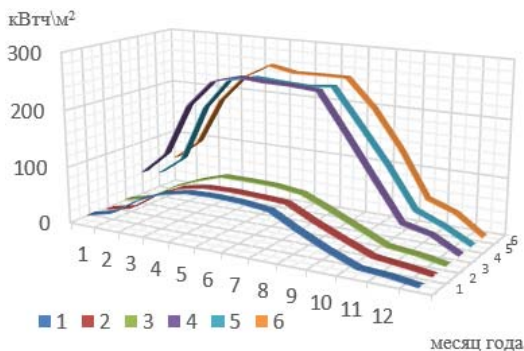


Рисунок 5 – Удельная вырабатываемая энергия при классическом расположении солнечных модулей в 1 – Полоцке, 2 – Минске, 3 – Гомеле и удельная вырабатываемая энергия конструкцией в 4 – Полоцке, 5 – Минске, 6 – Гомеле

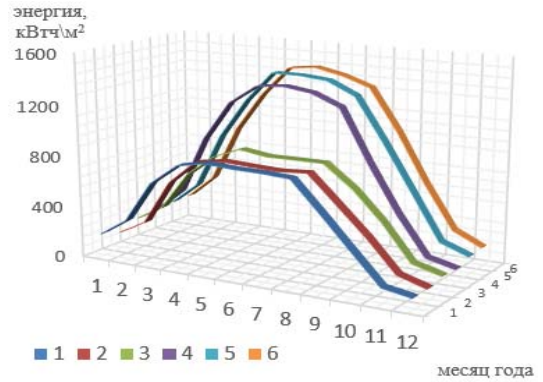


Рисунок 6 – Суммарная вырабатываемая энергия конструкцией в 1 – Полоцке, 2 – Минске, 3 – Гомеле и суммарная вырабатываемая энергия при классическом расположении солнечных модулей в 4 – Полоцке, 5 – Минске, 6 – Гомеле

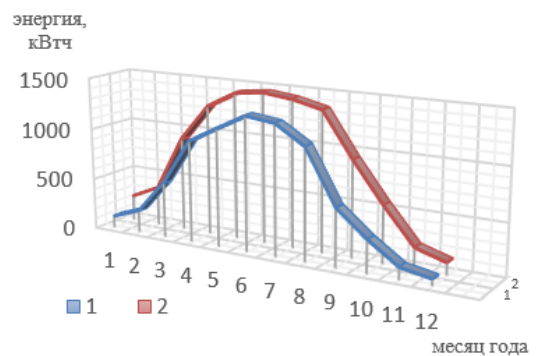


Рисунок 7 – Суммарная вырабатываемая энергия 1 – конструкцией на фасаде Национальной библиотеки, 2 – при классическом расположении

Заключение. Представленная конструкция не является единственно возможной, по причине того, что доступная площадь и ее форма могут быть совершенно разными. Таким образом за счёт огромной вариативности трёхмерные солнечные модули могут быть использованы в условиях с ограниченной площадью и сложного рельефа.

Литература

1. Marco Bernardi, Nicola Ferralis, Jin H. Wan, Rachele Villalon, Jeffrey C. Grossman. Solar Energy Generation in Three Dimensions / Energy and Environmental Science, 2012. – P. 7.
2. Joint Research Centre European Commission, PVGIS project [Electronic resource]: – Mode of access: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmaps/eur.htm> – Date of access: 20.06.2020.
3. [Electronic resource]: – Mode of access: https://www.gosolarcalifornia.ca.gov/equipment/pv_modules.php – Date of access: 20.06.2020.

УДК 671.153

ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА СКАНИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ Палабугин М.В., Усолицев В.П.

Ижевский Государственный Технический Университет имени М.Т. Калашиникова
Ижевск, Российская Федерация

Введение. В современной России проблема обеспечения законности оборота драгоценных камней стоит остро. Во многом это связано с многовековой любовью русской знати к ювелирным украшениям, опасной криминальной обстановкой, из-за чего вероятность подмены тех или иных драгоценных камней увеличивается. Плюс ко всему вышеперечисленному, есть необходимость в усовершенствовании текущих систем по регистрации драгоценных камней и созданию новых. Это поможет снизить риски продажи подделок в ювелирных магазинах, а сбывать краденый товар станет намного сложнее.

Известно, что драгоценные камни чем-то похожи на человеческие отпечатки пальцев. Дело в том, что не существует двух одинаковых драгоценных камней. Дело в том, что у природных камней всегда уникальный химический состав. Также, у каждого камня есть свой набор дефектов. Совокупность всех этих составляющих и делает драгоценный камень уникальным [1].

Нашей задачей было разработать лазерную установку, которая могла бы с высокой точностью сканировать тот или иной кристалл алмаза, тем самым создавая карту его дефектов. Полученные данные заносились бы в базу данных. При покупке того драгоценного камня, покупателю выдавалась бы уникальная ссылка, перейдя по которой в сеть Интернет, он смог бы удостовериться о подлинности купленного им изделия.

База данных дефектов драгоценных камней. Для того, чтобы идентификация драгоценных камней происходила быстрее и качественнее мы создали базу данных. В её основу легла иерархическая структура. Она основана на том, что каждый дефект в конкретном кристалле даёт свою тень на экране, а совокупность этих дефектов образует уникальный рисунок из дефектов, который больше нигде не встречается. Занесённый в базу данных, данный «отпечаток пальца» будет присвоен к конкретному бриллианту. При совпадении формы темных пятен и их распределения по кристаллу можно будет судить об идентичности алмаза с данными из базы данных.

Дефекты алмаза можно разделить на микро и макродефекты. Это показано на рисунке 1 [2]:

Точечные дефекты – это включения различных атомов непосредственно в кристаллическую решётку алмаза. Наиболее часто встречаемые инородные атомы – это водород, кремний, азот, бор.

Дефект С – это единичный атом азота, который замещает соответствующий атом углерода.

NV-Дефект – атом азота в позиции замещения рядом с вакансией в кристаллической решётке.

Дефект А – два атома азота, расположенных в соседних узлах кристаллической решётке алмаза [2].

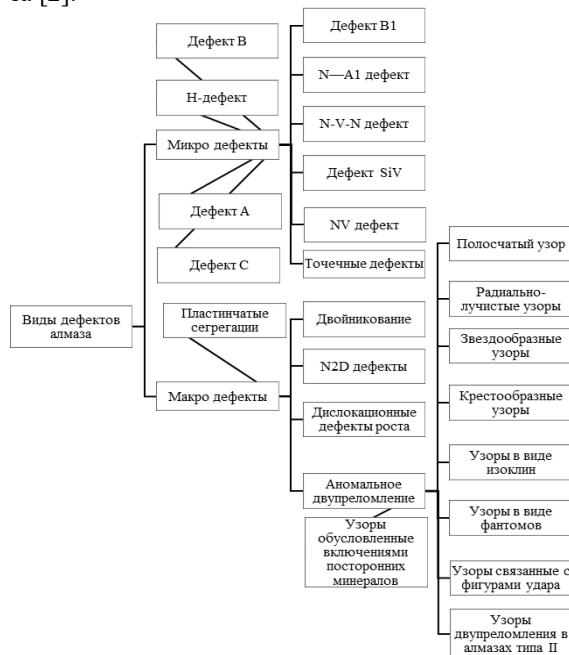


Рисунок 1 – Виды микро и макродефектов в алмазе

Дефект В1 – это дефект, который характеризуется тем, что в кристаллической решётке алмаза заменяются четыре атома углерода на азот.

Н-Дефект – это дефект, напрямую связанный с водородом в составе алмаза.

Дефект В – в данном случае атом бора замещает в кристаллической решётке алмаза атом углерода. Алмаз при этом приобретает полупроводниковые свойства [2].

SiV – Дефекты – это кремний-вакансионные дефекты. Он состоит из двух вакансий между которыми располагается атом кремния.

Теперь перейдём к рассмотрению макродефектов. К ним можно отнести изменения в кристалле на уровне кристаллической решётки. Существуют следующие виды макродефектов [2].

Двойникование. При данном дефекте в кристаллической решётке происходит изменение закономерно упорядоченной её структуры, в результате чего возникают отражения кристаллической структуры относительно плоскости двойникования [2].

N2D дефекты. Эти дефекты образуются в кристаллах алмаза из-за пластической деформации

ции после своего образования. В результате этих дефектов кристалл алмаза приобретает эпигенетическое окрашивание в розовато-лиловый и дымчатый тона [2].

Петли дислокаций. Данные дефекты образуются вблизи азотосодержащих слоёв из-за конденсации вакансий рядом с ними.

Дислокации. Зачастую эти дефекты имеют форму радиально-лучистых пучков с дефектным центром в центре кристалла. Обычно источником дислокации является какой-нибудь другой дефект, как правило, это инородные включения.

Пластинчатые сегрегации. Данный дефект в алмазе возникает из-за большого количества азота в составе кристалла.

Аномальное двупреломление в кристаллах алмаза. Оно возникает тогда, когда в кристалле присутствуют напряжения и искажения структуры [2].

Лазерная система сканирования структуры драгоценных камней. Была создана лазерная система, которая способна производить сканирование каждого алмаза. Результаты сканирования заносятся в «паспорт» алмаза и хранятся в общей базе данных [3].

При продаже, каждый покупатель сможет проверить подлинность своего алмаза. Достаточно будет просто перейти по специальной ссылке прямо в паспорт изделия. В нашей работе мы использовали лазер с длиной волны 405 нм [3]. Им производилось сканирование объекта, в результате чего на экране получалась уникальная картина распределения дефектов.

В состав оптической системы входит лазер, уширяющая пучок оптика. Её задача сделать лазерный пучок сопоставимым с размерами исследуемого объекта. Изображение проецируется на ячеистый экран. В зависимости от того, как распределены тёмные области, какова их величина и форма, говорится о наличии или отсутствии дефектов.

Созданная база данных, которая формировалась в процессе экспериментов, свидетельствует о том, что данная установка по сканированию

кристаллов алмаза полностью пригодна к использованию [3].

Выводы. Таким образом, наши исследования оптически прозрачных материалов показали, что возможно создать сканирующую систему, которая позволит с высокой точностью запечатлеть дефекты в кристаллах алмаза, сформировать их карту и, подобно отпечаткам пальцев, занести их в базу данных. Исходя из полученной информации, для каждого драгоценного камня формируется свой уникальный паспорт, по которому в дальнейшем можно будет опознать то или иное изделие из драгоценных камней.

В целях повышения эффективности опознавания драгоценных камней, нами была создана база данных дефектов, которые часто встречаются в алмазах. Она была организована в виде иерархической базы данных. Это позволило улучшить качество и скорость обработки информации. При совпадении сочетания тёмных пятен на экране с аналогичными в базе данных, то можно будет говорить, что данный драгоценный камень с определённой вероятностью подлинный. Чем больше таких совпадений, тем выше вероятность.

Литература

1. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. Изд. 2-е. – Москва: Академия наук СССР Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана, 1984. – 170 с.
2. Палабугин М.В. Разработка базы данных дефектов драгоценных камней / М.В. Палабугин, В.П. Усольцев // Новые направления развития приборостроения: материалы 13-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов, 15–17 апреля 2020 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев (пред. редкол.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2020. – С. 35–36.
3. Палабугин М.В. Методы дефектоскопии кристаллов драгоценных камней / М.В. Палабугин, В.П. Усольцев // Актуальные вопросы и перспективы развития науки, техники и технологии: материалы Международной научно-практической конференции, 27 марта 2020 г. / ЧУДПО «НИОЦ»; под общ. ред. Е.А. Назарова. – Казань: ЧУДПО «НИОЦ», 2020. – С. 64–69.

УДК 004.932, 681.325, 528.831.1

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АЛГОРИТМОВ СЖАТИЯ ДИКМ, JPEG И JPEG 2000 ПРИ ОБРАБОТКЕ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Романов Д.В., Фёдорцев Р.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

В связи с быстрыми темпами развития космического приборостроения появилась необходимость передачи большого объема данных по высокоскоростным радиопередачам с ограниченной пропускной способностью. Для реализации данного процесса широко используется сжатие

информации. Основной задачей для производителя при выборе метода сжатия является выбор алгоритма, который обеспечит необходимый поток видеoinформации без значительных потерь качества изображения. В данной публикации приведены результаты сравнения трех

наиболее распространенных методов сжатия информации.

Для сравнения были выбраны алгоритмы сжатия ДИКМ, JPEG и JPEG 2000.

Существует достаточно большое разнообразие алгоритмов сжатия ДИКМ (на основе дифференциальной импульсно-кодовой модуляции), отличающихся предсказателями. Из 10 предсказателей был выбран один, с минимальным искажением на резких границах и минимальным среднеквадратическим отклонением (СКО) искажения сигнала.

JPEG – один из самых новых и достаточно мощных алгоритмов. Оперирует алгоритм областями 8×8 , на которых яркость и цвет меняются сравнительно плавно. Вследствие этого, при разложении матрицы такой области в двойной ряд по косинусам, значимыми оказываются только первые коэффициенты. Таким образом, сжатие в JPEG осуществляется за счет плавности изменения цветов в изображении.

JPEG 2000 – графический формат, который вместо дискретного косинусного преобразования, применяемого в формате JPEG, использует технологию вейвлет-преобразования, основывающуюся на представлении сигнала в виде суперпозиции базовых функций – волновых пакетов.

Для сравнения алгоритмов использовались контрастные изображения с большим количеством границ «Город» (рисунок 1). Разрядность исходного файла 12 бит. Качественная оценка снимков проводилась по показателю линейное разрешение на местности (ЛРМ). Известно, что величина ЛРМ зависит от величины суммарной функции передачи модуляции (ФПМ) и отношения сигнал-шум (ОСШ). В результате исследования влияния сжатия на составляющие ЛРМ (обработано более 50 снимков), стало известно, что сжатие влияет на ОСШ, а именно, на величину СКО, ввиду чего, оценка влияния сжатия на качество изображения проводилась по СКО. К снимкам применялось сжатие 4 бит/выборку (трехкратное сжатие) тремя различными методами, после чего получался разностный кадр (восстановленного после сжатия снимка и исходного изображения без сжатия). Для восстановления снимка после сжатия использовались встроенные программные средства MathLab. По разностным кадрам строились гистограммы искажений и рассчитывалось СКО.

Результаты сравнительного анализа. Гистограммы искажений при сжатии 4 бит/выборку с помощью алгоритмов ДИКМ, JPEG и JPEG 2000 для снимка с условным названием «Город» показаны в таблице 1.

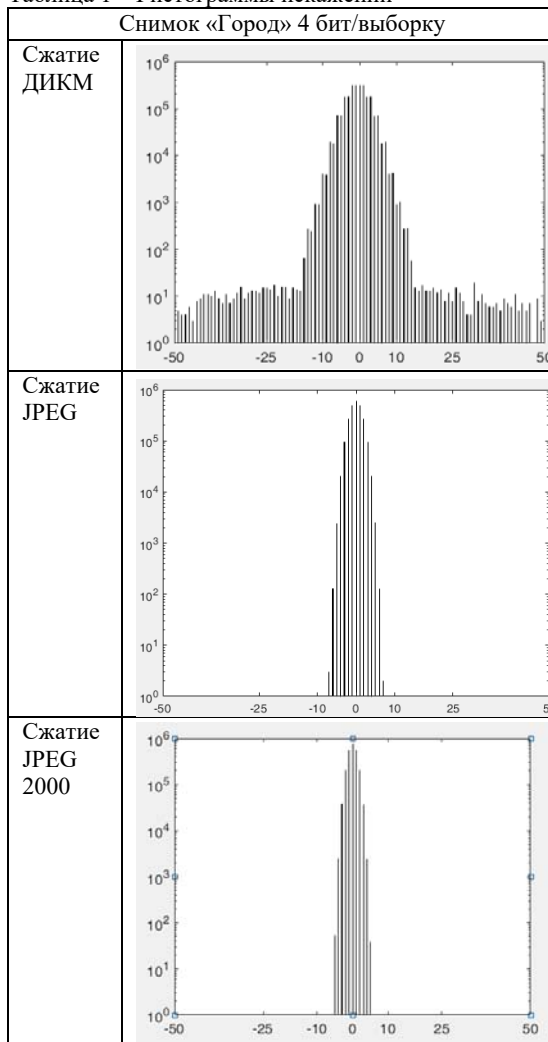
Анализ данных таблицы 1 показывает, что для сжатия ДИКМ характерна широкая гистограмма из-за искажений на резких границах, а также широкая центральная часть гистограммы,

относящаяся к зонам снимков с небольшими изменениями яркости.



Рисунок 1 – Исходный снимок «Город»

Таблица 1 – Гистограммы искажений



В таблице 2 даны соответствующие таблице 1 СКО искажения сигнала по кадру (разностного кадра: восстановленного после сжатия снимка и исходного без сжатия снимка).

Таблица 2 – СКО искажения сигнала по кадру

СКО разностного кадра	Сжатие 4 бит на выборку	Сжатие 2 бит на выборку
ДИКМ	9,6	не обеспечивает
JPEG	1,56	5,56
JPEG 2000	1,22	4,21

Анализ данных таблицы 2 показывает, что из трех алгоритмов сжатие JPEG 2000 обеспечивает наименьшее СКО искажения сигнала для контрастных изображений с большим количеством границ при одинаковых коэффициентах сжатия. Для оценки влияния сжатия изображений ЛРМ на рисунке 2 приведен график зависимости ЛРМ от СКО.

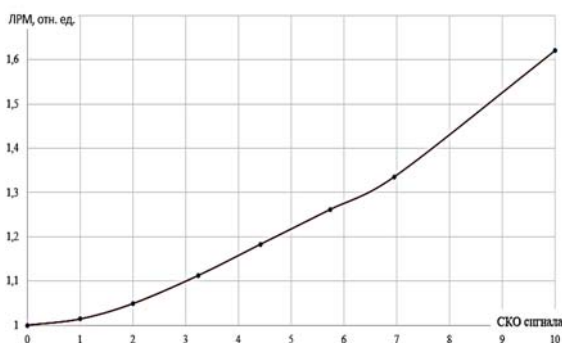


Рисунок 2 – График зависимости ЛРМ от величины СКО

По сравнению с ДИКМ, алгоритмы сжатия JPEG и JPEG 2000 обеспечивают более высокое качество изображения. А при больших коэффициентах сжатия (6–10 крат) алгоритмы сжатия JPEG и JPEG 2000 являются единственными возможными к применению. По сравнению с JPEG, алгоритм сжатия JPEG 2000 обеспечивает СКО искажения сигнала меньше на $\approx 30\%$, что позволяет проводить сжатие (в 5–10 крат) и восстановление снимков без видимых потерь качества (ЛРМ) за счет высокого ОСШ.

Литература

1. Д. Сэломон. Сжатие данных, изображения и звука. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с.
2. Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории // – М.: Техносфера, 2006. – 272 с.
3. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. // Пер. с англ. – М.: Техносфера. – 2006. – 1104 с.
4. Тропченко А.А., Молчанов В.А. Особенности сжатия цветных изображений JPEG-подобными алгоритмами // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО / Вып.32. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – С. 22–26.
5. Тропченко А.Ю., Курносенков И.Н. Анализ современных стандартов сжатия видеоданных // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО / Вып.32. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – С.17–21.
6. <https://habr.com/ru/post/251417/>
7. Алгоритмы сжатия. 2006. Гродненский государственный университет им. Янки Купалы. Факультет математики и информатики. Режим доступа: http://mf.grsu.by/UchProc/livak/po/comprsite/theory_image_02.html http://www.compression.ru/book/part2/part2_3.htm

УДК 621.3.038.825.2

РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ЧИРПИРОВАННЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА КРИСТАЛЛЕ Yb:YAP

Руденков А.С.^{1*}, Кисель В.Э.¹, Ясюкевич А.С.¹, Ованесьян К.Л.², Петросян А.Г.², Кулешов Н.В.¹

¹НИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ
Минск, Республика Беларусь

²Институт физических исследований НАН Армении
Аштарак-2, Армения

Анотация. В данной работе представлены результаты разработки регенеративного усилителя чирпированных фемтосекундных лазерных импульсов на кристалле Yb:YAP.

Получены импульсы длительностью 600 фс на центральной длине волны излучения около 1041 нм. Средняя выходная мощность составила 3,5 Вт при оптической эффективности усиления 18 % и частотах следования 50 и 200 кГц.

Введение. Кристаллы иттриевого алюмината со структурой перовскита YAlO₃ (YAP), легированные ионами редкоземельных элементов были широко изучены в качестве активных сред лазеров с диодной накачкой. Интерес к данным кристаллам обусловлен хорошими теплофизически-

ми и механическими свойствами, высокой анизотропией, использованием широкораспространенного метода роста Чохральского.

В данной работе представлены результаты исследования кристалла Yb³⁺:YAlO₃ в качестве активной среды регенеративного усилителя чирпированных фемтосекундных импульсов.

Кристаллы иттриевого алюминат, легированные трехвалентными ионами иттербия характеризуются широкими и относительно гладкими полосами сечений стимулированного излучения (СИ) (рисунок 1).

Наиболее интенсивная полоса сечений СИ имеет пик на длине волны около 999 нм с характерным значением $3,13 \cdot 10^{-20}$ см² для E//с-

поляризации. Умеренные значения сечений СИ ($0.4\text{--}1.1 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$) кристалл демонстрирует E//b- и E//c-поляризации в диапазоне 1 005–1 030 нм.

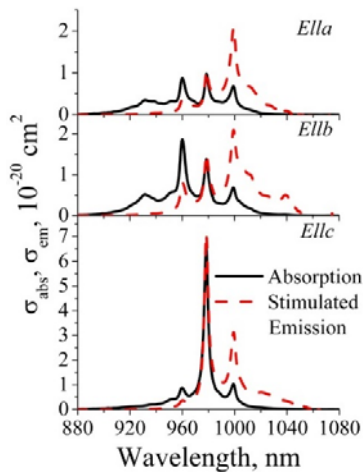


Рисунок 1 – Спектры сечений поглощения и стимулированного излучения кристалла Yb:YAP

Режим непрерывной генерации. Для проведения лазерных экспериментов была собрана экспериментальная установка на основе четырехзеркального резонатора, работающего в середине первой зоны стабильности, что обеспечивало стабильную работу при изменении термлинзы в активной среде в широких пределах. В качестве источника накачки использовался InGaAs лазерный диод с волоконным выводом излучения (30 Вт, $\Phi 105 \text{ мкм}$, $NA = 0,15$).

Предварительно были проведены лазерные эксперименты в режиме непрерывной генерации (рисунок 2).

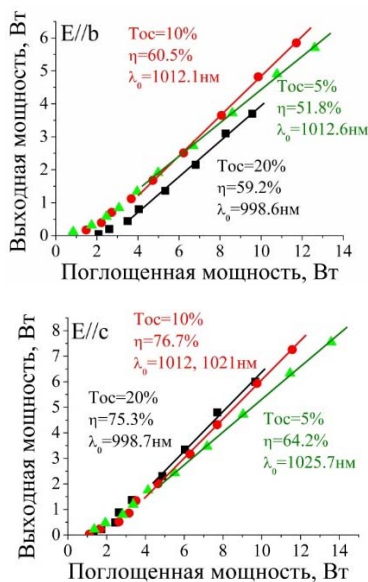


Рисунок 2 – Характеристики лазера в режиме непрерывной генерации

Получены средние выходные мощности до 7,6 Вт, максимальная дифференциальная эффективность 76,7 %.

Для перестройки длины волны генерации в резонатор лазера вводилась призма. Кривая перестройки длины волны генерации лазера для E//c-поляризации представлена на рисунке 3.

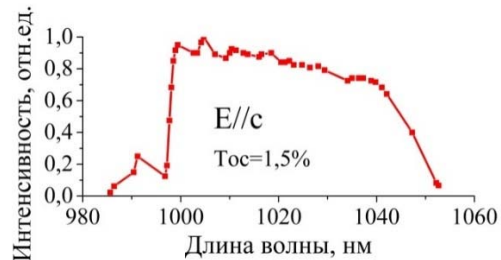


Рисунок 3 – Кривая перестройки длины волны генерации лазера

Получена перестройка длины волны генерации в диапазоне 67 нм (985,6–1052,7 нм) для E//c-поляризации при пропускании выходного зеркала 1,5 %.

Регенеративное усиление УКИ. Усилитель организован по широко распространенной схеме, состоящей из задающего генератора – фемтосекундного Yb:KYW лазера, селектора лазерных импульсов на кристалле ВВО. Селектор понижал частоту следования цуга импульсов до кГц-го диапазона значений с целью последующего эффективного усиления в резонаторе усилителя. Отселектированные импульсы поступали в блок стретчера, собранный по схеме Мартинеса на базе одной отражательной дифракционной решетки с периодом $1\,800 \text{ мм}^{-1}$. Стретчер вносил положительную ДГС и УКИ длительностью 100–200 фс растягивался до значений около 100–150 пс с соответствующим снижением пиковой мощности, что позволяло исследовать процесс усиления УКИ без риска возникновения паразитных нелинейных эффектов, таких как самофокусировка излучения, а также снизить вероятность пробоя оптических элементов усилителя.

Резонатор усилителя был собран по Z-образной четырехзеркальной схеме, что позволяло получать необходимые значения перетяжек в активном элементе и на глухом зеркале вблизи ячейки Поккельса (согласование моды резонатора и пучка импульсов задающего генератора), а также широкий диапазон стабильности при изменении параметров термической линзы, наведенной в активном элементе.

На рисунке 4 представлены спектры импульсов задающего генератора и усиленных импульсов при частотах следования 50 и 200 кГц.

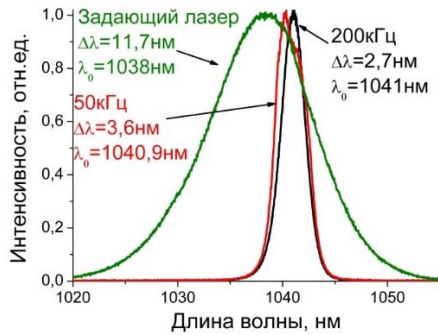


Рисунок 4 – Спектры импульсов задающего генератора и усиленных импульсов

На спектрах видно сильное влияние эффекта сужения спектра импульса в процессе усиления. При частоте следования импульсов составила 3,6 нм и уменьшилась до 2,7 нм при частоте 200 кГц. Средняя выходная мощность системы усиления (после компрессора) составила 3,5 Вт, оптическая эффективность 18 %. На рисунке 5 показана автокорреляционная функция усиленных импульсов (при частоте 50 кГц).

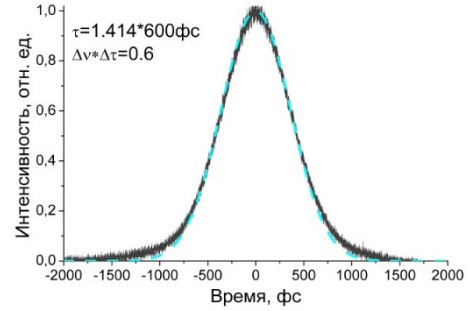


Рисунок 5 – Автокорреляционная функция усиленных импульсов

Измеренная длительность импульса составила 600 фс, произведение длительности импульса на спектральную полуширину в частотном выражении $\Delta\nu \cdot \Delta\tau = 0,6$.

Закключение. Проведенная работа показывает высокую перспективность кристаллов Yb:YAP для применения в качестве активных сред регенеративных усилителей chirпированных импульсов при условии принятия дополнительных мер по компенсации негативного влияния эффекта сужения спектра импульса в процессе усиления.

УДК 621.3.038.825.2

ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ПИКОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРОМ НА КРИСТАЛЛЕ Yb:LuAP

Руденков А.С.^{1*}, Кисель В.Э.¹, Ясюкевич А.С.¹, Ованесьян К.Л.², Петросян А.Г.², Рубцова Н.Н.³, Ковалев А.А.³, Преображенский В.В.³, Кондратюк Н.В.⁴, Гоман Д.А.⁴, Кулешов Н.В.¹

¹НИИ Оптических материалов и технологий БНТУ
Минск, Республика Беларусь

²Институт физических исследований НАН Армении
Аштарак-2, Армения

³Институт физики полупроводников имени А.В. Ржанова, СО РАН
Новосибирск, Российская Федерация

⁴ЗАО Солар ЛС
Минск, Республика Беларусь

Анотация. В данной работе представлены результаты разработки пикосекундного лазера с выходной мощностью 12 Вт на кристалле Yb:LuAP, работающего в режиме пассивной синхронизации мод (ПСМ) на основе полупроводникового зеркала с насыщающимся поглотителем SESAM. Получены импульсы длительностью 2 пс на центральной длине волны излучения около 999 нм при оптической эффективности генерации 38 % и частоте следования 70 МГц. Реализован режим генерации второй гармоники на кристалле LBO длиной 20 мм с критическим угловым синхронизмом и получена средняя мощность излучения второй гармоники 4,8 Вт. Представлены предварительные результаты исследования параметрической генерации света при синхронной накачке гене-

ратора на кристалле LBO и получена перестройка длины волны в диапазоне 668–783 нм.

Введение. Уникальные спектроскопические свойства трехвалентных ионов иттербия в кристаллах алюминатов со структурой перовскита [1, 2] (YAlO₃, LuAlO₃) делают данные материалы отличными кандидатами для использования в качестве активных сред пикосекундных лазеров так как обладают высокими сечениями стимулированного излучения (СИ) ($3,7 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$) в сравнительно узком спектральном диапазоне около 999 нм. Столь высокое значение сечения СИ делает возможным эффективную генерацию пикосекундных импульсов даже в несолитонном режиме синхронизации мод (со значительно более высоким порогом генерации).

Высокие теплофизические свойства алюминатов со структурой перовскита [3, 4], малый Стоксов сдвиг между длинами волн накачки и генерации ($\lambda_{\text{нак}} \approx 976$ нм, $\lambda_{\text{ген}} \approx 999$ нм) и использование квази-внеосевой схемы продольной накачки активной среды, описанной в предыдущих работах авторов [5–8] обеспечивает работу лазера с высокой средней выходной мощностью и малой тепловой нагрузкой на активную среду.

Лазерные эксперименты. Для проведения лазерных экспериментов в режиме пассивной синхронизации мод была собрана экспериментальная установка, представленная на рисунке 1.

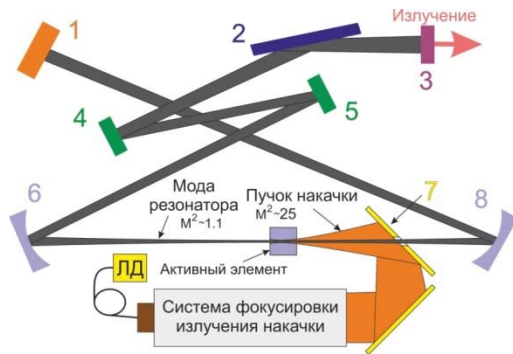


Рисунок 1 – Схема лазера с ПСМ:

- 1 – высокоотражающее зеркало или затвор;
- 2 – тонкопленочный поляризатор; 3 – выходное зеркало; 4, 5 – компенсационные зеркала;
- 6, 8 – сферические зеркала (высокоотражающее покрытие на длинах волн 900–1100 нм);
- 7 – высокоотражающее зеркало для ввода излучения накачки (высокоотражающее покрытие на длинах волн 900–1100 нм); ЛД – лазерный диод накачки

Установка основана на четырехзеркальном резонаторе, работающем в середине первой зоны стабильности, что обеспечивает стабильную работу при изменении термлинзы в широких пределах, стабильный размер моды резонатора на затворе и возможность плавной регулировки последнего. В качестве источника накачки использован InGaAs лазерный диод с волоконным выводом излучения (30 Вт, $\Phi 105$ мкм, NA=0,15).

Предварительно были проведены лазерные эксперименты в режиме непрерывной генерации и получены средние выходные мощности до 13 Вт, максимальная дифференциальная эффективность 84,5 %.

Для перестройки длины волны генерации в резонатор лазера вводилась призма. Кривые перестройки длины волны генерации лазера представлены на рисунке 2.

Получена перестройка длины волны генерации в диапазоне 987–1069 нм для E//c поляризации при пропускании выходного зеркала 1,5 %.

Для работы лазера на длине волны около 999 нм были увеличены активные потери резонатора путем использования выходного зеркала с пропусканием 20 % на длине волны генерации.

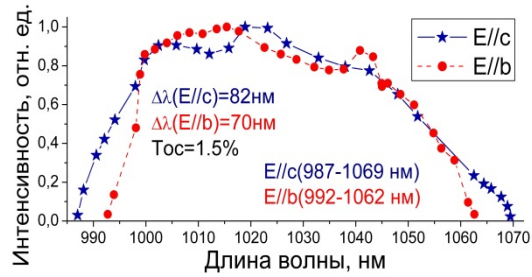


Рисунок 2 – Кривые перестройки длины волны генерации лазера

Максимальная средняя выходная мощность 12 Вт получена с оптической эффективностью 38 %. Спектр излучения лазера в режиме ПСМ представлен на рисунке 3.

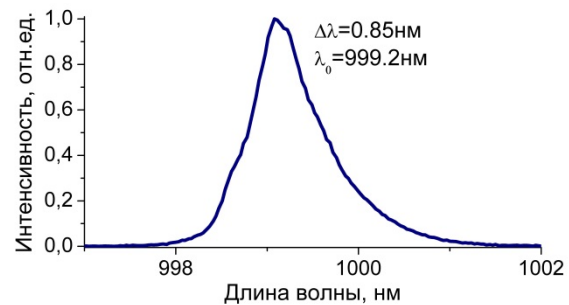


Рисунок 3 – Спектр излучения лазера в режиме ПСМ

Спектральная полуширина импульсов составила 0.85 нм, центральная длина волны 999,2 нм. Автокорреляционная функция импульсов представлена на рисунке 4.

Длительность импульса составила 2 пс, параметр качества – произведение длительности импульса на спектральную полуширину в частотном выражении $\Delta\nu \cdot \Delta\tau = 0,51$, что свидетельствует о близости импульсов к спектральноограниченным с учетом Гауссова временного профиля.

Генерация второй гармоники исследовалась с применением кристалла LBO длиной 20 мм при первом типе синхронизма ($\varphi = 11^\circ$, $\theta = 90^\circ$). Максимальная средняя выходная мощность 4,8 Вт получена с эффективностью преобразования 48 % при падающей мощности основной частоты 10 Вт.

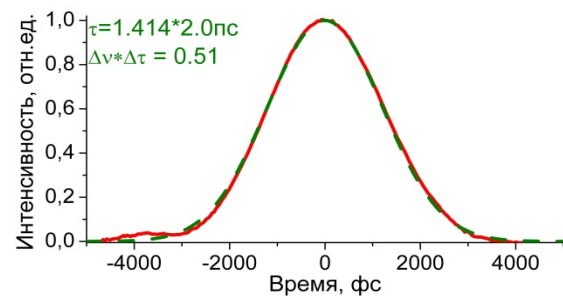


Рисунок 4 – Автокорреляционная функция генерируемых импульсов

Разработанный пикосекундный лазер совместно с генератором второй гармоники были использованы для синхронной накачки параметрического генератора света (ПГС) на кристалле LBO ($\varphi = 0^\circ$, $\theta = 90^\circ$, Тип I) длиной 40 мм.

Диапазон перестройки 115 нм (668–783 нм) (см. рисунок 5) и максимальная средняя мощность 0,7 Вт получены с эффективностью преобразования 24 % при падающей мощности накачки 3 Вт.

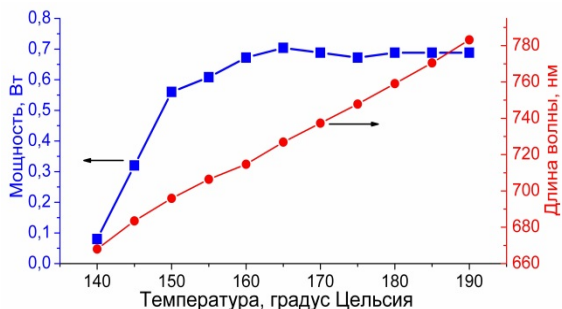


Рисунок 5 – Зависимости выходной мощности и длины волны от температуры кристалла ПГС

Заключение. Проведенная работа показывает высокую перспективность кристаллов Yb:LuAP для применения в качестве активных сред высокоэнергетических лазеров с пассивной синхронизацией мод, генерирующих импульсы пикосекундной длительности.

Литература

1. Viktor E. Kisel et.al., Opt. Lett. 33, 2194–2196 (2008).
2. Alexander Rudenkov et.al, Opt. Lett. 41, 5805–5808 (2016).
3. R.L. Aggarwal et.al., Journal of Applied Physics B 98, 103514 (2005).
4. M.J. Weber et.al., Applied Physics Letters 15, 342 (1969).
5. Alexander Rudenkov et.al., Opt. Lett. 40, 3352–3355 (2015)
6. A.S. Rudenkov et.al, 18th Conference on Laser Optics, St. Petersburg, Russia, 4-8 June 2018. – P. TuR1-16.
7. Alexander Rudenkov et.al, 8th EPS-QEOD Europhoton Conference, Barcelona, Spain, 02–07 September, 2018. – ThA2.3.
8. Alexander Rudenkov et.al, Opt. Lett. 42, 2415–2418 (2017).

УДК 681.787

ИЗМЕРЕНИЕ РАДИУСОВ ЛИНЗ ДЛЯ КРУПНОГАБАРИТНОЙ ОПТИКИ АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Артюхина Н.К.¹, Самусенко А.А.¹, Черных И.В.²

¹Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

²ОАО «Пеленг»

Минск, Республика Беларусь

Оптические детали со сферическими поверхностями (линзы, зеркала) являются широко распространенными элементами оптических систем. Качество изображения, создаваемого оптическими системами, во многом зависит от того, насколько точно соответствуют расчетным значениям радиусы кривизны сферических поверхностей, полученные при изготовлении оптических деталей. Поэтому измерение радиусов линз сферических поверхностей является обязательной и весьма ответственной операцией как при изготовлении, так и при контроле оптики, особенно крупногабаритной [1].

Существующие методы контроля радиусов кривизны можно разделить на контактные и бесконтактные. К первым относятся измерения на кольцевых сферометрах и метод пробных стекол, ко вторым – метод контроля с помощью автоколлимационного микроскопа или автоколлимационной зрительной трубы, измерение на фокометре и другие [2].

Современный уровень развития приборостроения позволяет с высокой точностью проводить измерения небольших радиусов оптических поверхностей (в пределах от –1000 до

+1000 мм). Сферометры (рисунок 1, а) выдают кратность значений, равную 0,01 мкм и выше, но являются контактными приборами и при измерении больших значений радиусов могут выдавать значительную ошибку, вызванную небольшим относительным перемещением измерительного элемента – штока.

Высокоточными приборами являются и фокометры. Один из них, MELOS 530 (Германия) (рисунок 1, б) позволяет измерять радиусы кривизны оптических деталей в диапазоне от –480 до +530 миллиметров с погрешностью порядка 0,3 % [3].



Рисунок 1 – Приборы для измерения радиусов кривизны линз

Отметим, что для измерения радиусов оптических поверхностей можно применять и горизонтальные интерферометры, оснащённые измерительной линейкой. Примером является интерферометр Zygo. Однако, его высокая стоимость и иное основное предназначение (измерение качества поверхностей оптических деталей) не позволяют в полной мере использовать данный прибор для измерения радиусов поверхностей.

Таким образом, рассмотренные выше приборы имеют недостатки: являются либо контактными, либо дорогостоящими, либо имеют невысокий диапазон измерений. Потому при контроле больших радиусов оптической поверхности (более 1000 мм по абсолютной величине) следует применять автоколлимационный метод, который осуществляется с помощью микроскопов и зрительных труб, а одним из основных его преимуществ является бесконтактность [4].

В данной работе приведены результаты измерений рабочих и контрольных пробных стёкол с диапазоном радиусов от $-18\,845$ до $+8\,673$ мм автоколлимационным методом по схеме с тест-объектом точкой, на интерферометре и сферометре. Схема измерения автоколлимационным методом представлена на рис. 3:

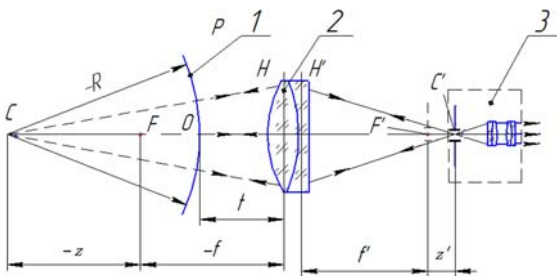


Рисунок 3 – Схема измерения автоколлимационным методом положительных радиусов кривизны:

1 – контролируемая деталь; 2 – объектив зрительной трубы; 3 – автоколлимационный микроскоп

Объектив зрительной трубы предварительно выверяется по автоколлимационному микроскопу на бесконечность. Контролируемая деталь P с радиусом кривизны R устанавливается перед объективом зрительной трубы. Автоколлимационный микроскоп с точечной диафрагмой перемещается вдоль оси от объектива (или к объективу, если поверхность P вогнутая) до получения резкого автоколлимационного изображения точки. Из хода лучей ясно, что центр кривизны сферической поверхности C и точка C', совпадающая с точечной диафрагмой, оптически сопряжены, поэтому к ним применима формула Ньютона

$$zz' = -f'^2. \quad (1)$$

Как можно заметить из схемы, что:

$$-z - f = -R + t. \quad (2)$$

Учитывая, что $-f = f'$, и используя формулу Ньютона, получаем для выпуклых поверхностей:

$$-R = \frac{f'^2}{z} + f' - t \quad (3)$$

Для вогнутых:

$$R = \frac{f'^2}{z'} - f' + t \quad (4)$$

Для оценки величины перемещения z' автоколлимационного микроскопа использовалась специализированная трёхкоординатная подставка фирмы Standa с шагом перемещения винта в 1 мкм и возможностью оценивать величину перемещения винта в автоматическом режиме с помощью специализированного программного обеспечения. Это позволяет с высокой точностью определить значение z' , которое, как видно из (3), (4) имеет определяющее значение при измерении радиусов поверхностей оптических деталей.

Сама же оценка производилась по виду дифракционного изображения точки. Обработка данных и вывод изображения точки осуществлялся через специализированное программное обеспечение Video EVS-2018, которое также применяется для измерения коэффициента передачи модуляции (КПМ), функции концентрации энергии (ФКЭ) и иных критериев качества изображения.

Также для получения сравнительных данных, когда это было возможным, производились измерения на кольцевом сферометре и интерферометре. В итоге, были получены следующие данные для положительных радиусов (приведена выборка для семи радиусов, таблица 1).

Таблица 1 – Результаты измерений положительных радиусов кривизны

Паспортное значение, мм	Сферометр Super-sphere	Интерферометр ZYGO	Автоколлимационный метод
505,718	505,38	505,85	502,601
1013,227	1012,41	1013,22	1012,36
1333,149	1323,60	1329,65	1328,22
2753,473	2721,74	-	2753,069
3731,131	4086,24	-	3723,391
4611,452	4512,09	-	4603,052
8673,342	8578,85	-	8689,108

Измерение отрицательных радиусов кривизны больших размеров на интерферометре произвести невозможно, поэтому приводим сводную характеристику результатов измерений на кольцевом сферометре и автоколлимационным методом (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты измерений отрицательных радиусов кривизны

Паспортное значение, мм	Сферометр Supersphere	Автоколлимационный метод
-2 000,148	-1 963,1	-2 024,05
-2 884,481	-2 823,3	-2 880,59
-5 754,271	-5 644,6	-5 795,21
-7 586,149	-7 525,5	-7 613,46
-9 600,152	-9 379,4	-9 603,52
-16 749,421	-16 344,0	-17 320,28
-18 845,310	-18 058,3	-19 023,45

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что высокую точность при измерении положительных радиусов кривизны величиной до 1500 мм можно получить при измерении всеми вышеперечисленными методами, но при измерении больших радиусов кривизны на сферометре величина отклонения существенно изменяется.

Так, при измерении радиуса кривизны 3 731,131 мм ошибка сферометра составила

9,5 %, в то же время как по автоколлимационному методу отклонение составило -0,21 %. В среднем же отклонение от номинала равняется 0,2 % для положительных радиусов кривизны и 0,9 % для отрицательных.

Величина разброса результатов измерений Δ при контроле радиуса кривизны 8 673,342 мм составила 0,05 %.

Таким образом, автоколлимационный метод является более универсальным для измерения больших радиусов кривизны, а оценка по дифракционному виду точки позволяет учесть индивидуальные особенности зрения операторов, проводящих измерения.

Литература

1. Мальцев М.Д. Прикладная оптика и оптические измерения / М.Д. Мальцев, Г.А. Каракулина. – М.: Машиностроение, 1986. – С. 409–412.
2. Креопалова Г.В. Оптические измерения / Г.В. Креопалова, Л.Н. Лазареева. – М.: Машиностроение, 1987. – С. 83–91
3. Operating Manual MELOS 530. Version 10/2005, - Muller-Wedel Optical GmbH.
4. Кривовяз Л.М. Практика оптической измерительной лаборатории / Л.М. Кривовяз, Д.Т. Пуряев. – М.: Машиностроение, 1974. – С. 144–146.

УДК 528.084

ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ И СОДЕРЖАНИЯ ПИГМЕНТОВ В ОБРАЗЦАХ РАСТЕНИЙ

Силюк О.О., Литвинович Г.С., Ломако А.А., Станчик В.В.,
Гуляева С.И., Бручковский И.И.

*Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Дистанционные измерения растительного и лесного покрова является развивающейся сферой деятельности на сегодняшний день ввиду широкого распространения и применения спутниковых и беспилотных авиационных измерений. Данные таких измерений используются для мониторинга состояния растительности, обнаружения стресса растений на ранних стадиях, исследований видового состава растительности и т.д. Для корректного анализа, верификации и составления методик обработки дистанционно измеренных данных необходимо проведение качественных лабораторных исследований образцов растительности.

Лабораторный комплекс CHERRY (Chlorophyll Estimation and Reflectance Registration sYstem) создан с целью совместных измерений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) образцов растений и количественного содержания в них хлорофилла и других пигментов. Такие совместные измерения представляют научный интерес, так как позволяют проводить исследования корреляций между об-

разцами КСЯ фитоэлементов и содержанием пигментов в них.

Конструктивно комплекс CHERRY состоит из двух частей: гониометра и фотометра. Измерения КСЯ и пигментов производятся при помощи одного спектрометра Solar M150 [1], таким образом минимизируются инструментальные погрешности.

Гониометр предназначен для измерений спектров и последующего вычисления КСЯ объектов с высоким спектральным разрешением в диапазоне 400–2500 нм в надириной геометрии визирования для различных углов возвышения имитатора солнца. В качестве осветителя применяется комбинация квазипараллельного источника (имитатор солнца) и диффузного источника (имитатор неба).

Схема гониометра представлена на рисунке 1. Исследуемый образец, расположенный на вращающейся платформе 1, освещается имитатором солнца, формирующим квазипараллельный световой пучок с высокой степенью равномерности, состоящим из лампы накаливания 2, вогнутого

зеркала 4 и коллиматора 3. Кроме того, образец 1 освещается при помощи имитатора неба – протяженного источника белого света сплошного спектра, состоящего из белых светодиодов 11, отражателя 12 и диффузного рассеивателя 13.

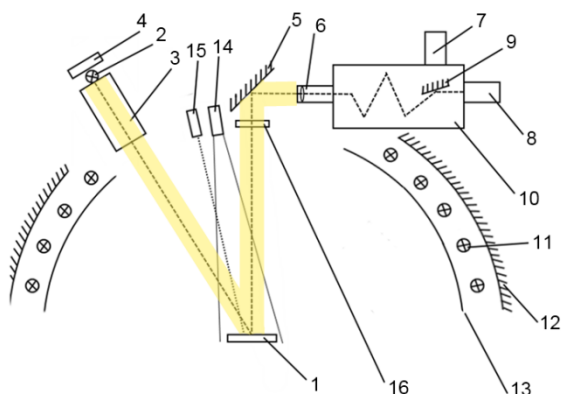


Рисунок 1 – Схема гониометра:

1 – вращающаяся платформа; 2 – лампа накаливания; 3 – коллиматор; 4 – вогнутое зеркало; 5 – плоское зеркало; 6 – система освещения входной щели спектрометра; 7 – детектор на диапазон 1–2,5 мкм; 8 – детектор на диапазон 0,4 – 1 мкм; 9 – зеркало выбора детектора; 10 – спектрометр; 11 – светодиод белый; 12 – зеркальный отражатель; 13 – диффузный рассеиватель; 14 – камера; 15 – красный лазер; 16 – поляриод

Отраженный исследуемым образцом 1 оптический сигнал направляется плоским зеркалом 5 в систему освещения входной щели 6 спектрометра 10 так, что реализуется надирная геометрия измерений спектров отражения образца 1. Спектрометр 10 имеет возможность автоматической смены дифракционных решеток и перенаправления оптического сигнала на один из двух детекторов – видимого 8 и инфракрасного диапазона 7 при помощи плоского зеркала 9.

Для юстировки оптической схемы гониометра и привязки поля зрения спектрометра 10 к положению образца 1 используется камера 14 и юстируемый полупроводниковый лазер 15, что в совокупности позволяет произвести обрисовку границ поля зрения спектрометра на изображении исследуемого образца.

Положение имитатора солнца контролируется при помощи моторизованной оптической платформы с точностью 0,9', как и введение образца 1 в поле зрения спектрометра. Переключение детекторов при помощи зеркала 9, управление спектрометром (ширина входной щели, выбор дифракционной решетки, выбор длины волны, установка фильтра), управление детекторами – осуществляется удаленно, что позволяет проведение эксперимента по измерению объекта 1 в автоматическом режиме.

Имитатор солнца схематично представлен на рисунке 2 и состоит из осветителя 1, коллимирующего объектива 2, сферического зеркала 3,

теплообменников 4 и водяного контура системы охлаждения 5.

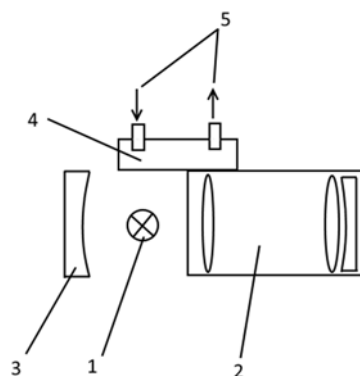


Рисунок 2 – Схема имитатора солнца:

1 – осветитель; 2 – коллимирующий объектив; 3 – сферическое зеркало; 4 – теплообменники; 5 – система охлаждения

Осветитель 1 представляет собой галогеновую лампу накаливания мощностью 150 Вт, питаемую током 6,25 А. Коллимирующий объектив 2 размещен таким образом, чтобы обеспечить квазипараллельность и однородность светового пучка, сферическое зеркало 3 служит для увеличения плотности потока энергии в световом пучке. Для эффективного отвода тепловой энергии от осветителя и объектива применяются два медных теплообменника 4, через которые циркулирует дистиллированная вода.

Имитатор неба схематично изображен на рисунке 3 и состоит из белых светодиодов 1, зеркального отражателя 2 и диффузного рассеивателя 3. Назначение имитатора неба состоит в увеличении уровня сигнала на изучаемом объекте без увеличения уровня теплового воздействия, а также в создании геометрии освещенности, аналогичной естественным условиям.

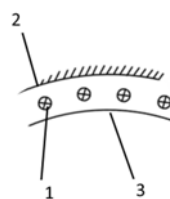


Рисунок 3 – Схема имитатора неба:

1 – светодиод; 2 – зеркальный отражатель; 3 – диффузный рассеиватель

Вторая часть лабораторного комплекса CHERRY состоит из фотометра, предназначенного для измерения оптической плотности вытяжек пигментов, которые получают путем выдерживания мелконарезанных листьев в ацетоне или другом растворителе. Оптическая схема фотометра представлена на рисунке 4. Юстируемое зеркало 5 и спектрометр 10 идентичны представленным на рисунке 1.

Излучение источника 1 коллимируется в квазипараллельный пучок при помощи собирающей

линзы 2, проходит через кювету с раствором пигментов 3, после чего зеркалами 4 и 5 направляется в спектрометр 10. В качестве источника излучения 1 выбран светодиод по той причине, что в отличие от лампы накаливания не оказывает теплового воздействия на кювету с раствором, вследствие которого конвективные потоки в кювете с исследуемыми пигментами 3 создают изменяющийся во времени оптический сигнал.

Для работы установки в режиме фотометра достаточно сместить вращающуюся платформу 1 (рисунок 1) в сторону и включить источник 1 (рисунок 4), после чего имеется возможность регистрировать спектры пропускания кюветы 3 (рисунок 4).

Для управления комплексом CHERRY, задания режимов работы и автоматизации вычислений КСЯ и содержания пигментов создано специальное программное обеспечение.

Таким образом, созданный лабораторный комплекс CHERRY позволяет проводить измерения КСЯ и содержания пигментов в образцах растительности, моделировать полетные измерения объектов растительности, устанавливая угол возвышения имитатора солнца и регулируя ин-

тенсивность излучения имитатора неба. Комплекс обладает рядом отличительных конструктивных особенностей, ввиду чего в данное время проходит процедуру патентования.

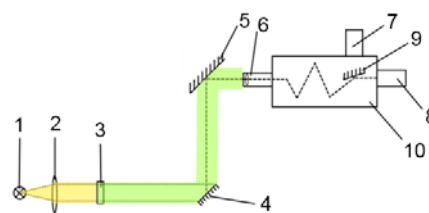


Рисунок 4 – Схема фотометра:

- 1 – источник белого света; 2 – собирающая линза; 3 – кювета с растворенным хлорофиллом; 4 – плоское зеркало; 5 – плоское зеркало; 6 – система освещения входной щели спектрометра; 7 – детектор на диапазон 1 – 2,5 мкм; 8 – детектор на диапазон 0,4–1 мкм; 9 – зеркало выбора детектора; 10 – спектрометр

Литература

1. Solar Laser Systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://solarlaser.com/devices/multi-purpose-compact-monochromator-spectrograph-m150/>. – Дата доступа: 07.10.2020.

УДК 681.783.25

ЮСТИРОВКА ВИЗИРНОГО КАНАЛА МАЛОГАБАРИТНОГО ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА

Соснина Л.А.^{1,2}, Фёдорцев Р.В.¹, Вяжевич Г.И.^{1,2}, Рупека С.С.^{1,2}

¹ Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

² УП «Научно-технический центр ЛЭМТ», БелОМО
Минск, Республика Беларусь

Большинство современных моделей лазерных дальномеров имеет ряд дополнительных функций, таких как измерение скорости передвигающегося объекта, быстрое переключение приоритетов цели, возможность измерения угла места и магнитного азимута цели, а так же возможность определения своих координат посредством систем глобального позиционирования, измерение температуры и давления окружающей среды и баллистической дальности.

Данная модель малогабаритного полупроводникового лазерного дальномера представляет собой оптико-электронный прибор, конструктивно объединяющий в себе две основные функциональные системы: дальномер и визир, и предназначен:

- для визуального наблюдения пространственно удаленных объектов;
- для измерения расстояний до объектов, находящихся на удалении до 3000 м.

Отличительной особенностью данной модели лазерного дальномера является наличие ряда следующих дополнительных опций:

- измерение дистанции до двух целей одновременно;
- дистанционное управление (проводное и беспроводное);
- измерение угла места и магнитного азимута цели;
- определение своих координат посредством систем глобального позиционирования GPS и ГЛОНАСС;
- измерение температуры и давления окружающей среды;
- измерение баллистической дальности для ряда видов ручного огнестрельного оружия.

Для правильной работы оптических приборов необходимо определенным образом установить визирные, оптические и другие оси по отношению к заданным конструкторским базам – плоскостям, осям вращения, осям уровней или к визирным, оптическим и другим осям или направлениям, внешним по отношению к юстируемому узлу или прибору [1].

Установку положения и ориентацию визирных линий оптических приборов осуществляют

при помощи контрольно-юстировочных приборов главным образом коллиматоров. Испытуемый прибор закрепляют на кронштейн контрольно-юстировочного прибора. Наблюдая в окуляр проверяемого прибора, определяют положение его сетки относительно сетки коллиматора. Ошибки положения визирной линии контролируемого прибора относительно его конструктивных элементов исправляют разными методами:

- 1) центрированием оптической системы путем перемещения оптической детали (объектива, сеток, призм и т. д.);
- 2) поворотом всей оптической системы прибора при помощи червячной передачи угломерного механизма (в угломерных приборах);
- 3) вращением вокруг вертикальной оси и наклоном к горизонтальной оси головной призмы или зеркала (в приборах с вращающимися головными призмами или зеркалами) [2].

Целью работы является разработка конструкции стенда для обеспечения возможности выполнения юстировки визирного канала: изменение положения оптических элементов дальномера для обеспечения перпендикулярности оптической оси визирного канала относительно базовой плоскости при работе в параллельных и сходящихся световых пучках.

Общий вид проектируемого стенда представлен на рисунке 1.

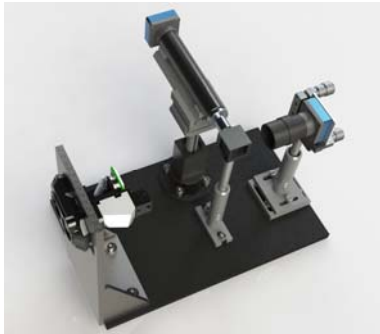


Рисунок 1 – Общий вид стенда

Принципиальная схема стенда представлена на рисунке 2.

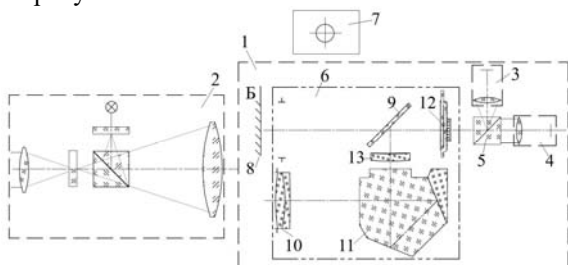


Рисунок 2 – Принципиальная схема стенда

Стенд состоит из основания 1, стойки со светоделительным кубиком 5, опорной базовой плоскости Б, цифрового USB-микроскопа 3, и

USB-видеокамеры с объективом 4, образующих цифровой коллиматор. Все части стенда установлены и закреплены на общем основании 1, представляющем собой жесткую металлическую плиту. Для обеспечения включения жидкокристаллического индикатора 12 юстируемой сборочной единицы 6 используется сторонний контрольно-электронный стенд, запитываемый от внешнего источника питания постоянного тока.

Юстировка элементов стенда проводится следующим образом:

1. Сторонний автоколлиматор 2 при помощи плоского зеркала 8 выставляют перпендикулярно опорной базовой плоскости Б по автоколлимационному блику. Для этого плоское зеркало 8 прикладывают к опорной базовой плоскости Б. Через окуляр автоколлиматора 2 наблюдают автоколлимационное изображение сетки *a*, отраженное от приложенного к торцу опорной базовой плоскости Б зеркала 8 в плоскости сетки *б*. Юстировочными винтами автоколлиматора 2 совмещают центры изображений сеток *a* и *б* (рисунок 3).

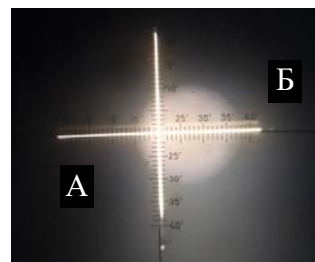


Рисунок 3 – Вид поля зрения автоколлиматора

2. USB-видеокамеру с объективом 4 подключают к персональному компьютеру 7, не входящему в состав стенда, и запускают программное обеспечение для визуализации изображения, полученного с данной видеокамеры. Заклонами юстировочных винтов приспособления, на котором закреплена USB-видеокамера с объективом 4 устанавливают данную видеокамеру так, чтобы на мониторе персонального компьютера 7 наблюдалось изображение сетки *a*) автоколлиматора 2. В программном обеспечении устанавливается электронное перекрестие так, чтобы оно совпадало с изображением наблюдаемого автоколлимационного перекрестия (рисунок 4).



Рисунок 4 – Совмещение перекрестий

3. На опорную базовую плоскость Б, представляющую собой полированную поверхность, устанавливают юстируемую сборочную единицу 6.

4. На место объектива 10 визирного канала устанавливают компенсирующий объектив, исключая влияние линзы 13 на изображение перекрестия автоколлиматора 2.

5. Заклонами зеркала 9 с помощью юстировочных винтов оптическую ось автоколлиматора 2 выставляют параллельно видеокамере 4: добиваются совмещения изображения сетки а) автоколлиматора 2 с ранее установленным электронным перекрестием.

6. Из юстируемой сборочной единицы 6 извлекают ранее установленный компенсирующий объектив и на его место устанавливают объектив 10. Цифровой USB-микроскоп 3 наводят на четкое изображение прицельной марки дальномера (рисунок 5). Используя подвижки цифрового USB-микроскопа вверх-вниз и влево-вправо, наводятся на центр прицельной марки жидкокристаллического индикатора 12.

7. Смещением объектива 10 добиваются резкого изображения сетки а) автоколлиматора 2 в плоскости жидкокристаллического индикатора. Объектив 10 фиксируют в данном положении.

8. Смещением призмы 11 добиваются совмещения изображения сетки а) автоколлиматора 2 с центром прицельной марки жидкокристаллического индикатора 12.

В результате проведения юстировочных операций была достигнута перпендикулярность оптической оси визирного канала относительно базовой поверхности с точностью $1'$.

Таким образом, был разработан стенд для обеспечения возможности выполнения юстировки визирного канала сборочной единицы малогабаритного полупроводникового лазерного дальномера, а также разработана методика юстировки.

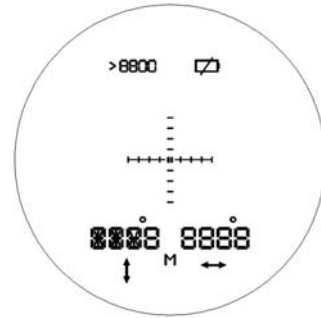


Рисунок 5 – Изображение жидкокристаллического индикатора

Литература

1. Ушаков О.К. Теория юстировки: учебное пособие для вузов / О.К. Ушаков – Новосибирск: СГТА, 2009. – 164 с.
2. Ельников Н.Т., Дитев А.Ф., Юрусов И.К. Сборка и юстировка опτικο-механических приборов. М.: «Машиностроение», 1974. – 348 с.

УДК 681.3

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИК-ИЗЛУЧЕНИЙ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР Сычик В.А., Глухманчук В.В., Уласюк Н.Н.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Для использования в структуре преобразователей оптической информации разработан специальный первичный преобразователь ИК-излучений на основе гетеропереходных функциональных элементов с варизонной i -областью [1, 2].

Типовая структура разработанного ФЭП изображена на рисунке 1а, а раскрывающая механизм его работы зонная диаграмма – на рисунке 1б. ФЭП состоит из р-п перехода на основе широкозонного полупроводника, включающего широкозонную обедненную n -область перехода и обедненную p -область перехода, которая контактирует с варизонным и сильнолегированным p^+ слоем из широкозонного полупроводника. N -область преобразователя содержит широкозонную обедненную n -область перехода, варизонный n_1 -слой, узкозонную n - p^+ область, состоящую из n_2 -слоя и сильнолегированного p^+ -слоя. Нижний сплошной омический контакт ФЭП

сформирован на p^+ -слое, а верхний решетчатый омический контакт, в проемах решетки которого размещен просветляющий слой, расположен на сильнолегированном p^+ -слое.

Для обоснования выбора материала компонентов, структуры и нахождения размеров областей синтезируемого ФЭП с заданным уровнем основных параметров (токовая, вольтовая фоточувствительность, обнаружительная способность) рассмотрим основные зависимости, описывающие эти параметры и физические процессы в структуре преобразователя. Поскольку интегральная токовая чувствительность, с учетом $J_\phi \gg J_r$,

$$S = \frac{\Delta J}{\Delta J \vartheta} \approx \left(J - \frac{J_r}{J \vartheta} \right) \approx J_\phi, \quad (1)$$

а интегральная вольтовая чувствительность

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta J \vartheta} \approx (U - U_r) / J \vartheta \approx U_\phi / J_\phi, \quad (2)$$

где $U_{\Phi} = \left(\frac{kT}{e}\right) \ln \left[\left(\frac{J_{\Phi}}{J_s}\right) + 1\right]$, J_{Φ} , U_{Φ} – фототок и напряжение; J_t , U_t – темновой ток и напряжение преобразователя, J_v – интенсивность светового потока, то необходимым условием синтеза высококачественного ФЭП является достижение предельно возможной величины фототока.

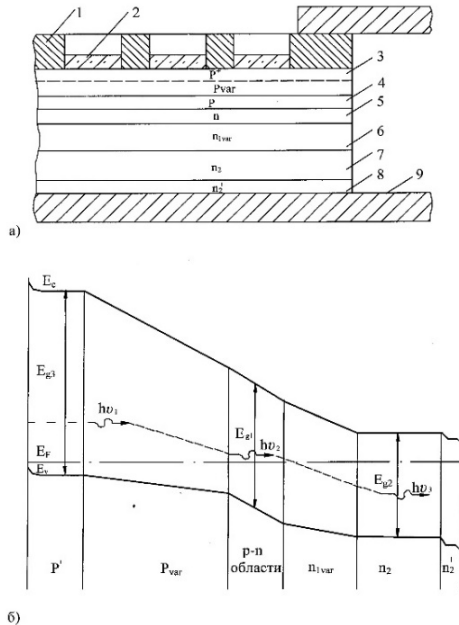


Рисунок 1 – Структура преобразователя оптических излучений на основе двойной гетероструктуры (а) и его зонная диаграмма (б):
 1 – решетчатый омический контакт;
 2 – просветляющий слой; 3 – P⁺-слой широкозонного полупроводника с варизонной областью;
 4, 5 – p-n переход; 6 – варизонный n-слой;
 7, 8 – узкозонный n-слой и его n⁺ сильнолегированная область; 9 – нижний сплошной омический контакт

Созданный ФЭП является преобразователем с p-n переходом на основе арсенида галлия. n-область ФЭП представляет слой n⁺ из InAs толщиной 2,8 мкм, легированный Te с концентрацией $N_D \approx 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$; n₂-слой выполнен также из InAs с концентрацией примеси Te $N_D \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ толщиной 0,3 мкм; варизонный слой n_{1var} выполнен из соединения Ga_xIn_{1-x}As, легирован Te с концентрацией $N_D \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 0,5–0,6 мкм. Ширина его запрещенной зоны изменяется от 1,43 эВ до 0,36 эВ. P-n переход из GaAs включает n-область, легированную Te с концентрацией $N_D \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и легированную Cd p-область с концентрацией $N_A \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Суммарная толщина p-n перехода 0,65 мкм, что составляет 0,9W_о. P-область ФЭП содержит варизонный слой P_{var}, выполненный на основе соединения Ga_xAl_{1-x}As, причем параметр X изменяется от 0 до 0,3, а ширина запрещенной зоны изменяется от 1,43 эВ до 2,15 эВ. Варизонный p-слой легирован Cd с концентрацией $N_A \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$, обладает толщиной 0,6 мкм;

p⁺ – сильнолегированный слой выполнен из арсенида алюминия, легированного Cd с концентрацией $N_A \approx 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, его толщина составляет 2,3 мкм. Нижний сплошной омический контакт реализован Te-Al-Ni общей толщиной 2 мкм, а верхний омический контакт 1,5 мкм сформирован структурой Cd-Al-Ni.

Занимаемая верхним контактом площадь на p⁺-слое составляет 12 %, рабочая площадь p⁺-слоя $S = 0,3 \cdot 0,3 \text{ см}$.

При воздействии квантов света, либо фотонов от других источников излучений на рабочую поверхность ФЭП со стороны решетчатого контакта, как следует из зонной диаграммы (рисунок 1, б), фотоны с энергиями $E_i = hv < Eg_3 [p^+]$, где $Eg_3 [p^+]$ – ширина запрещенной зоны p⁺-слоя, проходят просветляющий слой, p – широкозонный сильнолегированный слой, и достигают P_{var}-слоя и p-n перехода. Фотоны с $hv = Eg_3 \geq E_i \geq Eg_1$ поглощаются в p-варизонном слое и в p-n обедненных областях перехода, а фотоны с $hv = Eg_1 \geq E_i \geq Eg_2$ поглощаются в слое n_{1var} и в n₂-слое узкозонного полупроводника, создавая в поглощающих фотонах областях ФЭП избыточную концентрацию электронов и дырок в соответствии с зависимостями $\Delta n = \beta \alpha J_v \tau_n$; $\Delta p = \beta \alpha J_v \tau_p$, причем результирующий активно поглощаемый фотонный поток

$$J_v = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} J(v) dv, \text{ здесь } \beta, \alpha - \text{квантовый выход}$$

носителей заряда и коэффициент поглощения света; τ_n, τ_p – время жизни фотовозбуждаемых носителей, $Eg_2 < Eg_3$; $v_{\min} = Eg_2/h$; $v_{\max} = Eg_3/h$; h – постоянная Планка.

При заданной плотности фотонов J_v фототок $J_{\Phi} = e (\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p)$.

В легированных примесями слоях p_{1var}, n_{1var}, n₂ созданы примесные уровни $\Delta E_D, \Delta E_A$ глубиной 0,12 эВ и 0,08 эВ, которые возбуждаются фотонами дальней инфракрасной области.

Поскольку структурой ФЭП активно поглощается широкий спектр фотонов с энергиями от Eg_3, Eg_1 до $Eg_2, \Delta E_D$, то результирующий ток ФЭП, а следовательно S_i и S_u , будут значительно выше, чем у известных аналогов. Для сформированного ФЭП указанных размеров экспериментально получены основные характеристики: вольтовая $J_a = f(U_a)/J_0 = \text{const}$, спектральная $J_a = f(\lambda)/\Phi, U_a = \text{const}$ и энергетическая $J_a = f(\Phi)/U_a = \text{const}$.

Сформированный на основе гетеродиодной многослойной структуры типовой образец ФЭП обладает следующими электрофизическими параметрами: токовая чувствительность $S_i \approx 1,5\text{--}5,0 \text{ А/Вт}$; диапазон спектральной чувствительности $\Delta \lambda = 0,5\text{--}13 \text{ мкм}$; порог чувствительности $\Phi_n = 5 \cdot 10^{-8} \text{ лм Гц}^{-1/2}$; темновое сопро-

тивление $R_T \approx 5 \cdot 10^6 - 10^7$ Ом; постоянная времени $\tau = 10^{-5}$ с; рабочее напряжение $U_a = 5 - 20$ В.

Разработанный преобразователь ИК-излучений по сравнению с аналогами имеет более высокие S_I , $\Delta\lambda$, защищен патентом [3] и используется как важнейший функциональный узел в устройстве контроля тепловых излучений.

Заключение. Разработанный на основе многослойной структуры преобразователь ИК-излучений обладает высокими электрофизическими свойствами, в частности токовая чувствительность $S_I \approx 1,5 - 5,0$ А/Вт, диапазон спектральной чувствительности $\Delta\lambda = 0,5 - 13$ мкм, темновое сопротивление $R_T \approx 5 \cdot 10^6 - 10^7$ Ом.

УДК 681.785.554

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ АТОМНО-ЭМИССИОННЫЙ МНОГОКАНАЛЬНЫЙ СПЕКТРОМЕТР

Воропай Е.С.¹, Тарасов Д.С.^{1,2}, Гулис И.М.¹, Самцов М.П.², Радько А.Е.², Ермалицкая К.Ф.¹,
Зажогин А.П.¹, Шевченко К.А.², Кирсанов А.А.²

¹Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

²Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ
Минск, Республика Беларусь

Задачи проведения элементного анализа состава вещества возникают в большом количестве областей человеческой деятельности. С 1970-ых годов начались разработки лазерных методов исследования состава вещества. С этого времени активное развитие получил метод лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии. Он обеспечивает высокую чувствительность, оперативность и возможность проведения исследования образцов с пространственным разрешением, лимитируемым размером сфокусированного лазерного пучка на образце [1].

Силами кафедры лазерной физики и лаборатории спектроскопии НИИ Прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ разработан и изготовлен лазерный атомно-эмиссионный спектрометр (ЛАЭМС), в котором использованы принципиальные и схемные решения, призванные приблизить его к современным потребностям в такой аппаратуре в повседневной практике. Основные конструктивные особенности оптической системы спектрометра представлены в работе [2].

Система возбуждения построена на основе двух лазеров на основе Nd:YAG лазеров с ЭО модуляцией добротности и оптической накачкой излучением полупроводниковых матриц лазерных диодов, объединенных с системой сведения лазерных пучков и системой охлаждения в едином корпусе, работающий в частотном режиме (разработка Института физики НАН Беларуси). Лазеры с полупроводниковой накачкой по сравнению с ламповой отличаются более высоким ресурсом и стабильностью выходных парамет-

Преобразователь ИК-излучений используется как важнейший функциональный узел в устройствах контроля тепловых излучений.

Литература

1. Гурта Ф., Микула Д. Инфракрасные датчики температуры / Каучук и резина, 2005. – № 4. – С. 29–33.
2. Васильев В.В., Овсянко В.Н., Шашкин В.В. Инфракрасные фотоприемные модули на варизонных слоях КРТ и на структурах с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs/ Оптический журнал, 2005, 72. – № 6. – С. 63–69.
3. Патент RU 2080690, МКИ⁶, H01 L 31/048. Фотovoltaический преобразователь / Сычик В.А.

ров. Лазер обеспечивает генерацию сдвоенных импульсов длительностью не более 15 нс с длиной волны 1064 нм.

Другим принципиальным схемным решением ЛАЭМС стало использование вместо рефрактивных объективов зеркальных (внеосевые параболюиды). Это обеспечило ахроматичность всей системы фокусировки лазерного излучения на объекте и системы светосбора и ввода в оптоволоконный вход полихроматоров излучения плазмы. Важность устранения хроматической аберрации вызвана необходимостью соответствия относительных интенсивностей различных спектральных линий в излучении плазмы.

Для размещения исследуемого объекта разработан предметный столик, который обеспечивает перемещение образца в трех взаимноперпендикулярных направлениях. Перемещение вдоль луча осуществляется с использованием линейной низкопрофильной позиционируемой площадки (ручное перемещение), а в двух других направлениях – с помощью программноуправляемых шаговых двигателей.

Для регистрации спектров плазмы используются спектрометры с регистрацией на ПЗС-линейке на основе полихроматора SDH-1 (ЗАО «СОЛАР Лазерные Системы»): спектральный диапазон 190–800 нм, разрешение 0,1 нм при ширине одновременно регистрируемого спектрального интервала от 130 нм).

Выполнена разработка программного обеспечения (ПО), которое обеспечивает одновременное управление всеми узлами ЛАЭМС и основные

функции предварительной обработки, анализа и отображения спектральных данных. Разработка ПО выполнена средствами языка C++ в среде Microsoft Visual Studio 2005. При разработке использовалось SDK контроллера систем регистрации фирмы ORMINS на основе CCD датчиков. Управление дифракционной решеткой полихроматора выполняется вручную, показания микроиндикатора используются в программном обеспечении ЛАЭМС для калибровки спектрального диапазона полихроматора с системой регистрации.

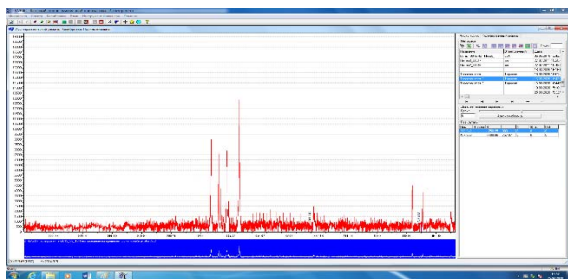


Рисунок 1 – Общий вид главного окна ПО ЛАЭМС

При помощи ПО ЛАЭМС производится:

- инициализация контроллеров шаговых двигателей (приводы перемещения предметного столика), источников света (двухимпульсный лазерный источник с полупроводниковой накачкой, п/п лазер, светодиод), полихроматора с системой регистрации на основе SDH-I;
- управление полихроматором с системой регистрации;
- управление видеокамерой микроскопа для получения и анализа изображений объекта и/или его участков, управление шаговыми двигателями для выбора области регистрации;
- управление лазером прицеливания для точного позиционирования места воздействия лазерных импульсов;

- управление светодиодом подсветки для улучшения идентификации объектов на изображении с видеокамеры микроскопа;
- управление прыгающим зеркалом для направления светового потока в систему регистрации;
- управление двухимпульсным лазерным источником с полупроводниковой накачкой для испарения пробы в выбранных участках объекта, регистрация спектра свечения плазмы;
- исследование полученного спектра, проведение качественного и количественного анализа состава материала;
- сохранение полученных данных на накопитель ЭВМ;
- загрузка сохраненных данных с накопителя ЭВМ и их анализ средствами ПО ЛАЭМС.

Среди основных достоинств ПО ЛАЭМС следует отметить, встроенную базу данных спектральных линий, на основании которой могут быть созданы методики качественного и количественного элементного анализа образцов с количеством определяемых химических элементов до 50. А также возможность независимой программной установки энергии импульсов двухимпульсного лазера (от 0 до 100 мДж).

Литература

1. Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). Fundamentals and Applications / Eds. A.W. Miziolek, V. Palleschi, I. Schechter. – Cambridge University Press, 2006. – 620 p.
2. Воропай Е.С., Гулис И.М., Зажогин А.П., Шевченко К.А., Радько А.Е., Кирсанов А.А., Купре-ев А.Г., Самцов М.П., Тарасов Д.С. Лазерный атомно-эмиссионный спектрометр с ахроматической оптической системой Приборостроение–2019 // Материалы 12-й Международной научно-технической конференции. 13–15 ноября 2019. – Минск. Изд.: БНТУ. – С. 390–392.

УДК 681.944

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Алексеев В.А., Усольцева А.В., Усольцев В.П.

*Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашиникова
Ижевск, Российская Федерация*

В настоящее время номенклатура материалов, применяемых в приборостроении, чрезвычайно велика и составляет несколько тысяч марок. В процессе конструирования приходится решать очень сложные задачи выбора материалов, наиболее полно отвечающих часто противоречивым требованиям [1].

Широкое распространение в приборостроении получило стекло, употребление стекла обусловлено неповторимым и своеобразным сочетанием физических и химических свойств. В приборостроении стекло применяется в пере-

менных и постоянных конденсаторах, в катушках самоиндукции, в вакуумных приборах, используют для производства подложек микромодулей печатных схем, малогабаритных конденсаторов, высоковольтных и высокочастотных изоляторов, приборов с ультрафиолетовым излучением, световых ячеек, световодов вычислительных машин, для волокон и стеклотканей, светофильтров, в том числе с переменным пропусканием. Из стекла изготавливаются защитные стекла для приборов, применяемые для предохранения механизма приборов от загряз-

нений, механических повреждений, проникновения пыли и брызг жидкости.

В состав стекол входят стеклообразующие окислы кремния, бора, фосфора, германия, мышьяка, натрия, калия, лития, кальция, магния, бария, алюминия, железа, титана, бериллия и др. В зависимости от основного используемого стеклообразующего вещества, стекла бывают оксидными (силикатные, кварцевые, германатные, фосфатные, боратные), фторидными, сульфидными и так далее. В зависимости от химической природы стеклообразующего вещества стекла делят на силикатные (SiO_2), алюмосиликатные ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$), алюмоборосиликатные ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$), алюмофосфатные ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5$) и др. По содержанию модифицирующих веществ стекла бывают щелочными (содержащими окислы Na_2O , K_2O), бесщелочными и кварцевыми [2].

Наряду со стеклом в приборостроении широко применяется органическое стекло. Органическое стекло, или полиметилметакрилат – продукт полимеризации метилметакрилата. Оно полностью состоит из термопластичной смолы. Органическое стекло – техническое название прозрачных в видимой части спектра полимерных материалов на основе органических полимеров, $[\text{-CH}_2\text{C}(\text{CH}_3)(\text{COOCH}_3)\text{-}]_n$, к ним относятся: полиметилметакрилат и другие поли(мет)акрилаты, полистирол, поликарбонаты, полимеры аллиловых соединений и др. Для достижения требуемых эстетических свойств органического стекла, на этапе производства в сырье добавляют различные синтетические добавки (пластификаторы) [3].

Широкое применение оргстекла обусловлено его уникальными характеристиками. Оно в 2,5 раза легче обычного стекла, отличается высокой пластичностью, ударопрочностью, стойкостью к химическому и радиационному воздействию. Показатель светопропускания оргстекла достигает 92–93 %, при этом степень прозрачности не изменяется со временем. Высокие электроизоляционные свойства, химическая стойкость, хорошая светопрозрачность определили применение этого материала в приборах, в медицинской промышленности, при протезировании, в светотехнической промышленности, в ансамблях с драгоценными камнями и драгоценными металлами и т. д. Особенно эффективно производство художественно-промышленных изделий из прозрачных материалов в часовой и ювелирной промышленности [4].

Учитывая особенности приборостроения: меньшие габариты деталей; высокую абсолютную точность изготовления, повышенную точность формы детали, более высокие требования по взаимному расположению поверхностей и осей, наиболее подходящей технологией для обработки деталей и поверхностей является лазер-

ная обработка. Лазерная обработка материалов не только обеспечивает новый уровень качества и скорости обработки в традиционных технологических операциях, но и создает предпосылки для принципиально новых конструкторских и технологических решений в приборостроении и других областях промышленности [5]. Возможности повышения производительности труда, экономии материалов, энергоресурсов, обеспечение быстрой переналадки производств делают задачу массового внедрения лазерных технологий чрезвычайно актуальной.

Несмотря на применение большой номенклатуры оптических материалов и широкие возможности лазерных технологий, лазерная обработка в приборостроении применяется недостаточно широко. Одной из проблем является отсутствие методики проектирования технологических процессов получения заданных параметров обработки с учетом возможностей лазерной технологии. На стадии подготовки производства возникают проблемы, связанные с выбором наиболее эффективных режимов, проведения расчетов экономической целесообразности, а также поиска направлений совершенствования технологии, характеристик текстуры, рельефа, отклонения профиля поверхностей. Поэтому в настоящее время конструктора и технологи вынуждены совершенствовать дизайн, разрабатывать технологию лазерной обработки опытным путем, часто разработчикам не удается реализовать замысел, предусмотренным проектом, в связи с недостаточной изученностью возможностей технологии и отсутствием конкретных рекомендаций для ее разработки.

Для выбора универсальных режимов лазерной обработки прозрачных материалов проведены эксперименты с воспроизведением ступенчатого клина [7] при ступенчатом изменении параметров излучения. Для исследования закономерностей, которым подчиняются реальные технологические процессы, на каждой ступени проведена статистическая оценка качества поверхности после обработки. Найденные закономерности имеют не только теоретическую ценность, они могут широко применяться на практике в планировании, управлении и прогнозировании.

Эксперимент проводился с использованием лазерной установки Trotec Speedy 100R с изменением одного из параметров от минимального до максимального с 15 градациями (мощности лазерного излучения, скорости перемещения лазерного луча, разрешающей способности наносимых изображений (количества точек на линейный дюйм), частоты повторения импульсов, угла падения), когда другие остаются постоянными.

Полученные образцы полутонного клина на кварцевом и органическом стекле в результате скачкообразного изменения мощности представлены на рисунках 1 и 2.



Рисунок 1 – Полученный образец полутонного клина на кварцевом стекле



Рисунок 2 – Полученный образец полутонного клина на органическом стекле

Статистическая обработка результатов, полученных с использованием микроинтерферометра МИИ – 4, блескомера ФБ-2, денситометра ДНС-2, экспертного опроса, показали, что для получения стабильного контура резки, высокохудожественного четкого и контрастного вида изображений, необходимой адгезии при заполнении изображения красителем, оптимальны следующие режимы лазерной обработки оптических материалов: мощность лазерного излучения 6 Вт, скорость лазерного гравирования 27,0 см/сек, разрешающая способность 500 dpi, частота импульсов 1000 Гц, диаметр сфокусированного лазерного луча на материале 0,1 мм.

Проведенные исследования показали, что для универсальности технологических режимов лазерной обработки прозрачных материалов перспективно использовать рекомендованные режимы. Образцы применения рекомендованных режимов лазерной обработки хрусталя и акрила представлены на рисунке 3.



Рисунок 3 – Применение лазерной обработки материалов в подарке молодоженам и письменном приборе [6]

Литература

1. Бутовский К.Г. Материалы приборостроения / К.Г. Бутовский А.В. Лясникова, Н.В. Протасова и др. – Саратов: Изд-во Саратов. техн. ун-та, 2005. –236 с.
2. Гормаков А.Н. Материаловедение и технология обработки конструкционных материалов в приборостроении / А.Н. Гормаков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 340 с.
3. Серова В.Н. Полимерные оптические материалы. – СПб.: Научные основы и технологии, 2015. – 384 с.
4. Приборостроение – XX век. / Сост. М.С. Шкабардня. М.: Совершенно секретно, 2004. – 768 с.
5. 提高使用激光技术进行识别的效率. Alekseev V.A., Usoltseva A.V., Usoltsev V.P. Increase in efficiency of use of laser technologies for identification / 上合组织国家的科学研究：协同和一体化 国际会议 参与者的英文报告 International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration” Part 1: Participants’ reports in English 2019年12月11日。中国北京 December 11, 2019. Beijing, China, 2019 PRC, 2019. – 149–156 p. DOI: 10.34660/INF.2019.22.43468
6. Прибор письменный настольный. Усольцева А.В., Усольцев В.П., Черных М.М. Патент на промышленный образец RU 109645, 16.07.2018. Заявка № 2017500418 от 19.06.2017.

УДК 681.7.023.72

СПОСОБ, ПОВЫШАЮЩИЙ ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ЕГО КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Филонова М.И.¹, Козерук А.С.¹, Р.О. Диас Гонсалес^{1,2}

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²Университетский политехнический институт Сантьяго Мариньо
Мерида, Венесуэла

При обработке конических поверхностей в машиностроении используют в основном методы обработки в условиях геометрического замыкания на токарных станках.

Такая технология ввиду наличия вибрации в технологическом оборудовании не позволяет получить конические поверхности с высокой степенью точности ее образующей (прямолинейности и правильной геометрической формы поперечного сечения по всей высоте конуса с по-

грешностью не более $\pm 0,25$ мкм [1, 2]). Упомянутых недостатков можно избежать, если использовать метод свободного притирания.

Однако недостатком технологии обработки конических поверхностей по методу свободного притирания является непостоянство скорости вращения заготовки вокруг собственной оси симметрии, поскольку эта скорость обусловлена наличием между обрабатываемой поверхностью и рабочей поверхностью инструмента сил тре-

ния, которые носят нестабильный характер из-за неравномерного распределения обрабатывающей абразивной суспензии [3].

Отмеченное устраняется, если образующую конуса расположить в контактирующей с инструментом плоскости сепаратора, регулированием относительной и переносной скоростей которого по инструменту поддерживают необходимую плоскостность его рабочей поверхности.

Схема реализации обработки конических поверхностей по методу свободно притирания приведена на рисунке 1. Здесь на инструменте 1 расположен сепаратор 2, в отверстие А которого помещена конусообразная заготовка 3. Сепаратор закреплен на наклеенном инструменте 4, шарнирно соединенном с поводком 5 выходного звена исполнительного механизма базового станка. При этом инструмент, заготовка и сепаратор установлены с возможностью регулируемого вращения со скоростями ω_n , ω_3 и ω_c соответственно, причем сепаратор в процессе обработки совершает также возвратно-вращательное движение со скоростью $\omega_{в-в}$.

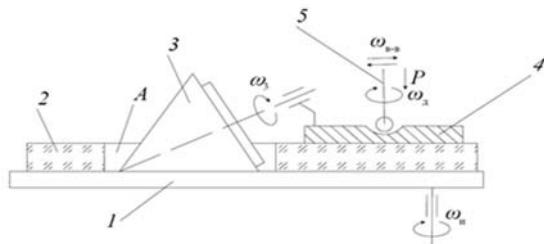


Рисунок 1 – Схема обработки конической детали

Предлагаемая схема обработки конических поверхностей может быть реализована на серийном рычажном станке [4]. Для управления процессом обработки на этом технологическом оборудовании, при котором обеспечивается равномерное срабатывание рабочей поверхности инструмента, непосредственно влияющей на прямолинейность образующей конуса, выполнили [5] структурный анализ исполнительного механизма рычажного станка, кинематическая схема которого представлена на рисунке 2.

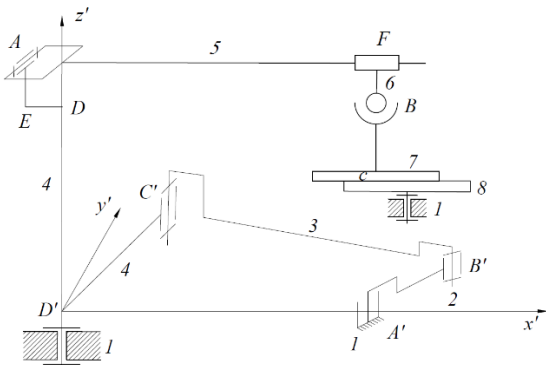


Рисунок 2 – Кинематическая схема исполнительного механизма рычажного станка

Звенья 2 и 3 этого механизма расположены в плоскости $Dx'y'$, а звенья 4, 5 и 6 – в плоскости, перпендикулярной $Dx'y'$. Звено 2 с неподвижным звеном 1, а также звенья 2 и 3, 3 и 4, 4 и 1, 4 и 5, 8 и 1 образуют вращательные кинематические пары, звенья 5 и 6 – поступательную пару. Верхнее звено 7 образует сферическую пару со звеном 6 и плоскую с нижним звеном 8. При этом звенья 1, 2, 3, 4 образуют шарнирный четырехзвенник [6].

Механизм шарнирного четырехзвенника работает следующим образом. Вращательное движение кривошипа 2 через шатун 3 преобразуется в возвратно-вращательное движение звена 4 и рычага 5. Последний через поводок 6 вызывает возвратно-вращательное перемещение верхнего звена 7 относительно нижнего 8.

В результате анализа определены геометрические параметры возвратно-вращательного движения верхнего звена, которое определяется движением центра С его рабочей поверхности (рисунок 3).

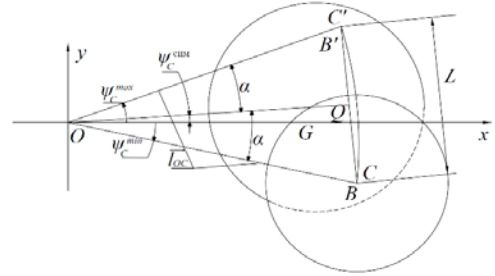


Рисунок 3 – Траектория возвратно-вращательного движения центра с рабочей поверхности верхнего звена

Поскольку при обработке плоских поверхностей центр шарика поводка и центр С рабочей поверхности верхнего звена находятся на одной вертикальной линии, то расстояние между крайними положениями центра С также равно L.

В рычажных станках величина L регулируется посредством изменения длины кривошипа l_2 , следовательно, необходимо установить аналитическую связь между этими геометрическими параметрами.

Введем обозначение (см. рис. 3): $\alpha = \frac{\psi_C^{\max} - \psi_C^{\min}}{2}$. Тогда $\psi_C^{\max} = \psi_C^{\text{снм}} + \alpha$, $\psi_C^{\min} = \psi_C^{\text{снм}} - \alpha$

Учитывая выражение для угла α , получаем:

$$\psi_C^{\max} = \psi_C^{\text{снм}} + \arcsin \frac{L}{2l_{oc}}, \quad \psi_C^{\min} = \psi_C^{\text{снм}} - \arcsin \frac{L}{2l_{oc}}.$$

Аналогичные равенства можно записать и для угла φ_4 :

$$\varphi_4^{\max} = \varphi_4^{\text{снм}} + \arcsin \frac{L}{2l_{oc}}, \quad \varphi_4^{\min} = \varphi_4^{\text{снм}} - \arcsin \frac{L}{2l_{oc}}.$$

Учитывая приведенные зависимости, определим выражение для l_2 :

$$l_2 = \sqrt{l_1^2 + l_4^2 - 2l_1l_4 \cos \left(\varphi_4^{\text{снм}} + \arcsin \frac{L}{2l_{oc}} \right)} - l_3.$$

Выводы:

1. Проведенные исследования шарнирного четырехзвенника исполнительного механизма станка позволили установить аналитическую связь между входным и выходным звеньями этого механизма, что дало возможность рассчитать длину первого из отмеченных звеньев в зависимости от требуемой величины амплитуды колебательного движения второго из них.

2. Созданы предпосылки для разработки инженерных методов управления процессом формообразования высокоточных конических поверхностей в условиях свободного притирания.

3. Обеспечена возможность исключить предварительные трудоемкие эксперименты по выявлению оптимальных наладочных параметров технологического оборудования в каждом конкретном случае.

Литература

1. Бардин А.Н. Технология оптического стекла / А.Н. Бардин. – М.: Высшая школа, 1963. – 519 с.
2. Зубаков В.Г. Технология оптических деталей / В.Г. Зубаков, М.Н. Семибратов, С.К. Шгандель; под ред. М.Н. Семибратова. – М.: Машиностроение, 1985. – 368 с.
3. Козерук А.С. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов на основе математического моделирования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01, 05.02.08 / А.С. Козерук. – Минск, 1997. – 317 с.
4. Сулим А.М. Производство оптических деталей / А.В. Сулим. – М.: Высшая школа, 1969. – 303 с.
5. А.С. Козерук, Р.О. Диас Гонсалес, М.И. Филонова, В.О. Кузнецик, Е.Н. Варопай. Кинематический анализ способа, повышающего точность обработки конических поверхностей Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2019. – Т. 64, № 4. – С. 429–437.
6. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин / И.И. Артоболевский – М.: Наука, 1988. – 640 с.

УДК 535.243:391.2

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ МИКРОЛИНЗФильчук А.С.¹, Фёдорцев Р.В.²¹ООО «ЭссентОптика»

Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

В последние десятилетие наблюдается тенденция к миниатюризации оптико-электронных приборов в целом и их оптических компонентов в частности. Наиболее широкий класс таких деталей составляют фокусирующие элементы: первые линзы сверхсильных иммерсионных микроскопов, линзы объективов в фотографических камерах смартфонов, наконечники эндоскопов, лазерные модули, волоконная связь и многие другие.

К миниатюрным относятся оптические детали с геометрическими размерами: диаметром $D = 0,5 \pm 0,001 - 10 \pm 0,01$ мм, при световом диаметре $> 85 - 95$ %, отношением $R/D = 1,0 - 0,5$, децентричностью $0,02 - 0,01$ мм, точностью формы сферической поверхности $\lambda/2 - \lambda/10$ при 633 нм, шероховатостью $Rz0,1$ мкм, чистота поверхности Р IV. Одним из определяющих параметров для микролинз является качество формируемого изображения: диаметр фокального пятна составляет $2,3 - 2,8$ мкм. Материалом для изготовления микролинз являются: оптическое стекло К8; кварц КУ-1, КВ и КИ; кристаллы Ge, Si, ZnSe, ZnS, KRS5, CaF₂, BaF₂, MgF₂, LiF, Al₂O₃, а также другие материалы из каталогов ГОСТ, Schott и OHARA [1]. Серийное технологическое производство микрооптики осуществляется преимущественно на оборудовании компании «Optotech», а нанесение оптических покрытий для УФ, видимого и ИК-диапазона на установках компании «Leubold Optics».

Для уменьшения влияния отраженного света на итоговое изображение объектива на рабочие поверхности микролинз наносят просветляющие оптические покрытия, повышающие коэффициент пропускания вплоть до $99,9$ %.

Поэтому возникает необходимость в контроле качества нанесенного просветляющего оптического покрытия на поверхности микролинз с помощью спектрофотометра. Однако в настоящее время на рынке оптико-электронных приборов не представлено ни одного спектрофотометра, позволяющего контролировать качество покрытий на сферических поверхностях малых диаметров и радиусов кривизны.

Контроль просветляющего покрытия на сферических поверхностях микролинз на пропускание, т. е. измерение света после прохождения через поверхности линзы, будет вносить дополнительную погрешность измерения. Так как в этом случае свет пройдет через обе поверхности линзы.

Согласно закону сохранения энергии падающий световой поток (принятый равным единице) при переходе из менее плотной среды в более плотную, представляет собой сумму коэффициентов пропускания, отражения, поглощения и рассеяния: $\tau + \rho + \gamma + \alpha = 1$

Так как коэффициенты поглощения и рассеяния на поверхностях с просветленным оптическим покрытием достаточно малы по отношению к коэффициентам пропускания и отражения, то

при проведении численных расчётов ими пренебрегают.

В связи с этим целью работы является разработка спектрофотометра для измерения коэффициента отражения от сферической поверхности радиусом кривизны до ± 5 мм и диаметром до 10 мм в спектральном диапазоне 380–990 нм.

Спектрофотометр будет построен на основе монохроматора по схеме Черни-Тернера. Источник излучения – галогенная лампа мощностью 20 Вт, приёмник излучения – кремниевый фотодиод производства Hamamatsu Photonics.

Прототипом для новой конструкции спектрофотометра является модель LINZA150 производства компании ООО «ЭссентОптикс» (рисунок 1). Данный спектрофотометр предназначен для измерения спектральных характеристик пропускания и оптической плотности линз и объективов, а также отражения от поверхности линз и плоских деталей.



Рисунок 1 – Общий вид спектрофотометра LINZA150

Спектрофотометр LINZA150 имеет возможность проводить измерения коэффициентов пропускания и отражения для выпуклых, вогнутых, сферических, асферических и цилиндрических линз; диаметром от 10 до 150 мм (в режиме пропускания) и до 100 мм (в режиме отражение) с радиусами кривизны ± 10 – ∞ мм. Фокусное расстояние линз должно быть в диапазоне ± 20 – ∞ мм для режима пропускания и ± 15 – ∞ мм для режима отражения [2].

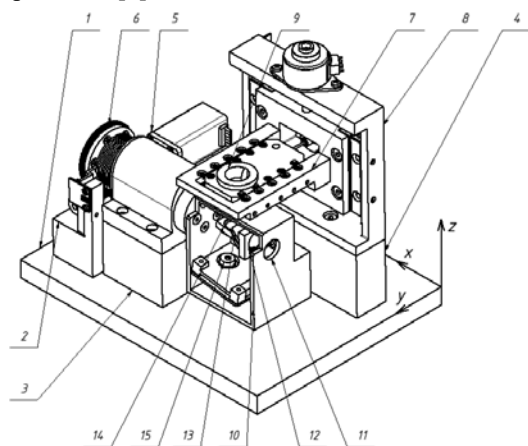


Рисунок 2 – Измерительный канал спектрофотометра: 1 – основание; 2, 3, 4 – кронштейны; 5 – червячный привод; 6 – вал с червячным колесом; 7, 8 – узлы смещения; 9 – оправа; 10 – измерительный узел; 11 – входное отверстие измерительного узла; 12 – фокусирующая линза в оправе; 13 – зеркало в оправе; 14 – линза в оправе; 15 – фотоприемник

Параллельный пучок после монохроматора и подвижной линзы (на рисунке 2 не показаны) проходит входное отверстие измерительного узла 11, фокусируется линзой в оправе 12, поворачиваясь зеркалом 13, на измерительной детали в оправе 9.

Излучение от детали отражается на линзу в оправе 14 и собирается на чувствительной площадке фотоприемника 15.

Узел спектрофотометра имеет возможность перемещаться вдоль осей y и z , а также вращаться вокруг оси x , что позволяет измерять коэффициент отражения от сферических поверхностей с минимальным радиусом кривизны ± 5 мм и на максимальном диаметре 6 мм.

Для расчёта максимального угла поворота луча относительно измеряемой детали обратимся к рисунку 2, данный угол будет равен разнице углов между касательной и хордой, проведенной в точку касания, и углом падения луча в нормальном положении.

Граничные условия, которые необходимо выполнить в соответствии с техническим заданием, являются минимальный радиус кривизны 5 мм и максимальный диаметр 6 мм.

Из геометрии известна теорема об угле между касательной и хордой, проведенной в точку касания: угол между касательной и хордой, проведенной в точку касания равен половине дуги, стягиваемой этой хордой (рисунок 3).

Таким образом:

$$\angle BMN = \frac{\overset{\frown}{MN}}{2}. \quad (1)$$

При этом известно, что значение дуги в градусной мере равно центральному углу окружности, то есть:

$$\overset{\frown}{MN} = \angle MON. \quad (2)$$

Центральный угол окружности связан с длиной хорды и радиусом кривизны следующим соотношением:

$$MN = 2R \sin\left(\frac{\angle MON}{2}\right), \quad (3)$$

где R – радиус кривизны, мм.

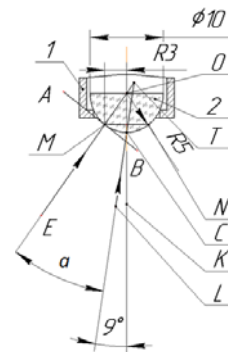


Рисунок 3 – Схема для определения максимального угла наклона луча относительно измеряемой детали: 1 – оправа приспособления; 2 – измеряемая поверхность детали

Из формулы (3) выразим центральный угол

$$\angle MON = 2 \arcsin\left(\frac{MN}{2R}\right). \quad (4)$$

Подставляя выражение (4) в формулу (1), учитывая равенство (2), получим

$$\angle BMN = \arcsin\left(\frac{MN}{2R}\right) = \arcsin(0,6) = 36^\circ$$

Тогда максимальный угол поворота луча относительно измеряемой детали будет равен

$$\angle ETL = \angle BMN - \angle LCK = 36^\circ - 9^\circ = 27^\circ,$$

где $\angle LCK = 9^\circ$ – это угол падения луча на сферическую поверхность измеряемой детали, известный из оптической схемы.

Таким образом максимальный угол поворота луча, который необходимо конструктивно обеспечить $\alpha = 27^\circ$.

Литература

1. Производственная компания ООО «МакроОптика». Россия. Москва. Буклет. – 20 с. <https://macrooptica.ru/f/macrooptica.pdf>.
2. ООО «ЭссентОптикс». Беларусь. Минск. Буклет. – https://www.essentoptics.com/f/file/LINZA_rus_092019.pdf.

УДК 621.3.038.825.2

АНАЛИЗ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ВОЛОС МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-ИСКРОВОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Шор Р.В.¹, Ясюкевич А.С.²

¹ООО «СОЛ инструментс»

Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Волосы человека несут информацию о метаболических изменениях концентраций химических элементов в организме за продолжительное время и содержат следы протекавших в нем биохимических процессов. Измерение концентраций химических элементов в волосах делает возможным диагностику дисбаланса витаминов и минералов, определение превышения допустимых норм токсичных веществ, а также установления причин различного рода загрязнений организма и выявления их источников. К примеру, значительное превышение свинца в организме может приводить к спазмам и болям в конечностях, поражению органов кроветворения и почек, бериллия – к угнетению многих ферментов и появлению аутоиммунных заболеваний многих ферментов и появлению аутоиммунных заболеваний. Недостаток или переизбыток какого-либо химического элемента говорит о необходимости коррекции не только рациона питания, но и множества других факторов [2]. Именно поэтому данное направление анализа так перспективно как в диетологии, так и в медицине вообще.

Лазерноискровая эмиссионная спектроскопия (ЛИСП) – метод спектрального элементного анализа, в котором анализируют спектры плазмы лазерной искры с поверхности исследуемого образца. Лазер создает на поверхности материала облако плазмы, свечение которой направляется оптической системой в спектрометр для последующего анализа. Преимущество данного метода для анализа волос человека перед другими заключается в том, что в настоящее время он позволяет определять массовое содержание 26 хи-

мических элементов в образце менее чем за 30 минут. Достаточно 50 мг волос для проведения анализа. Сложная пробоподготовка, как в методе индуктивно-связанной плазмы, не требуется. Так же безусловным плюсом можно считать возможность определения характера изменения концентраций химических элементов от корней пучка волос до их кончиков, производя последовательный ряд измерений на разной длине пряди. Это возможно благодаря малой зоне анализа, в то время как в рентгенофлуоресцентном методе, к примеру, можно получить только усредненное значение содержания элементов.

В методе ЛИСП спектры излучения исследуемого образца сравниваются со спектрами излучения эталонов (стандартных образцов), имеющих аттестованные значения концентраций химических элементов. В данной работе использовались международные сертифицированные стандартные образцы серий NCS DC 73347 и NCS ZC 81002.

Нами были проведены исследования волос мужчины в возрасте 40 лет без видимых патологий. Спектральная область, исследовании составила около 400 нм. Для железа, например, было выбрано 6 характеристических линий, нм: 258,5876, 259,9396, 261,1874, 261,3825, 302,0639, 404,5813. Увеличение количества характеристических спектральных линий для анализа повышает точность и уменьшает ошибку определения содержания элементов. Режим возбуждения плазмы – двухимпульсный, это позволяет значительно повысить интенсивность спектральных линий.

Таблица 1 – Результаты элементного анализа волос

№	Химический элемент	Допустимые значения (мужчина), мг/г [1]	Результат, мг/г (среднее по длине пряди ± погрешность, P = 0,95)
1	Ag (серебро)	0,02–4,0	0,040 ± 0,007
2	Al (алюминий)	0,5–25	4,6 ± 1,6
3	Ba (барий)	0,1–6,0	2,8 ± 0,7
4	B (бор)	0,1–3,5	2,4 ± 0,7
5	Be (бериллий)	0,005–0,1	0,037 ± 0,007
6	Ca (кальций)	300–1200	807 ± 210
7	Cr (хром)	0,2–2,0	0,52 ± 0,19
8	Cu (медь)	7,5–50	50 ± 8
9	Fe (железо)	10–30	17 ± 5
10	F (фтор)	10–100	11 ± 2
11	K (калий)	40–250	365 ± 66
12	Mg (магний)	25–130	60 ± 11
13	Mn (марганец)	0,2–2,0	0,85 ± 0,24
14	Mo (молибден)	0,02–2,0	< 0,1 –
15	Li (литий)	0,01–0,25	0,16 ± 0,03
16	Na (натрий)	50–600	158 ± 24
17	Ni (никель)	0,1–1,0	0,35 ± 0,15
18	P (фосфор)	100–200	108 ± 32
19	Pb (свинец)	0,05–5,0	< 3 –
20	Rb (рубий)	0,1–2,0	0,55 ± 0,10
21	Si (кремний)	10–70	158 ± 41
22	Sn (олово)	до 2,0	0,20 ± 0,05
23	Sr (стронций)	0,2–10	3,3 ± 0,8
24	Ti (титан)	0,1–4,0	1,4 ± 0,3
25	Y (итрий)	нет данных	< 1 –
26	Zn (цинк)	100–300	133 ± 21

Результаты исследования представлены в таблице. Полученные результаты, в совокупности с данными других исследований, позволят лечащему врачу дать рекомендации по корректирующему лечению и диете для поддержания здоровья пациента.

Далее планируется доработка математических моделей обработки полученных результа-

тов, а также увеличение числа анализируемых элементов.

Литература

2. Barrett, S. Commercial hair analysis: Science or scam. J Am. Med. Assoc. 1985, 254:1041–1045.

1. Скальный А.В. Химические элементы в физиологии человека. М.: Издательский дом «Оникс 21 век»: Мир, 2004. – 216 с.

УДК 528.716

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ВАРИАНТ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ ВИДЕОСПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ «СОВА-2-426»

Голубев Ю.В.¹, Щербаков Н.Г.¹, Ломако А.А.¹, Хомищев А.Д.¹, Беляев М.Ю.², Сармин Э.Э.²

¹Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ
Минск, Республика Беларусь

²Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева
Королев, Московская область, Российская Федерация

В рамках космического эксперимента (КЭ) по исследованию оптических характеристик Земли «Ураган» на борту Международной космической станции (МКС) используются различные приборы наблюдения, включающие фото- и видеоспектральную аппаратуру, наводимую на исследуемые объекты экипажем вручную через иллюминаторы. Однако на планирование таких экспериментов налагаются сильные ограничения, прежде всего связанные с необходимостью учета

распорядка дня экипажа и наличия у него времени, выделенного на проведение научных экспериментов. Решением, позволяющим расширить возможности по исследованию наземных объектов, является использование специальных автоматизированных платформ наведения (ПН).

По контракту с ПАО РКК «Энергия» НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ начал разработку автоматизированной системы ориентации видеоспектральной аппаратуры (СОВА) [1]. Си-

стема предназначена для автоматизации процесса измерений оптических характеристик подстилающих поверхностей при выполнении мониторинга земной поверхности в ходе проведения научно-прикладных исследований в КЭ «Ураган», а также должна обеспечивать установку на иллюминаторы служебного модуля (СМ) и многоцелевого лабораторного модуля (МЛМ) Российского сегмента (РС) МКС различной аппаратуры видео-, фото- и спектральной съемки для автоматического наведения и съемки по заданной программе космонавта или без его участия.

Для установки на РС МКС предусмотрено несколько модификаций аппаратуры СОВА.

ПН СОВА 426 устанавливается на иллюминатор диаметром 426 мм как СМ РС МКС, так и МЛМ РС МКС и обеспечивает возможность наведения съемочной аппаратуры по двум взаимно перпендикулярным осям с углами отклонения не менее $\pm 30^\circ$.

В настоящее время первый вариант СОВА-1-426 функционирует на борту МКС и позволяет производить съемку с использованием фотоаппаратуры и научной аппаратуры (НА) видеоспектральной системы (ВСС) без участия оператора с прогнозированием времени съемки на сутки вперед.

В данной работе рассматривается модифицированный вариант СОВА-2-426 (рисунок 1), включающий в себя ПН-2-426, блок электроники (БЭ) СОВА и основание для крепления ПН к иллюминатору.

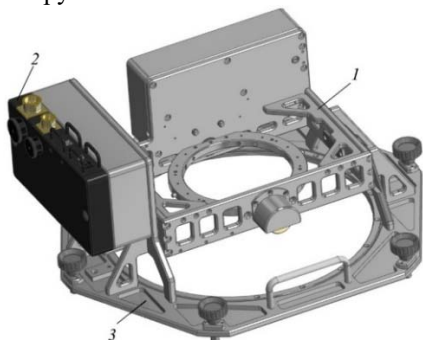


Рисунок 1 – СОВА-2-426:

1 – ПН-2-426; 2 – БЭ СОВА; 3 – основание для крепления ПН к иллюминатору

Основными элементами ПН-2-426 являются: основание с невыпадающими винтами крепления к иллюминатору диаметром 426 мм СМ или МЛМ РС МКС, два электромеханических привода, обеспечивающих поворот кольца ПН в двух взаимно перпендикулярных направлениях, два соосно установленных с осями механизмов приводов энкодера, обеспечивающих считывание углов поворота, четыре концевых выключателя, отключающих питание актуаторов (электромеханических приводов) в случае неподви-

денных поворотов системы сканирования на углы, превышающие 30° .

ПН СОВА-2-426 обеспечивает:

- Установку на иллюминатор МЛМ РС МКС съемочной аппаратуры: фотокамеры типа *Nikon*, видеоспектральной системы ВСС и др.;
- Возможность наведения по двум взаимно перпендикулярным осям с углами отклонения не менее $\pm 30^\circ$;
- Точность наведения не более $0,2^\circ$.

БЭ (рисунок 2) представляет собой металлический корпус 1 с винтами 2 крепления к ПН, экраном 3 для защиты от электромагнитных помех и расположенной внутри корпуса печатной платой 4, выполняющей функции:

- Контроллера управления системами наведения ПН;
- Контроллера датчиков положения углов отклонения ПН;
- Блока питания двигателей систем сканирования ПН;
- Блока питания контроллеров.

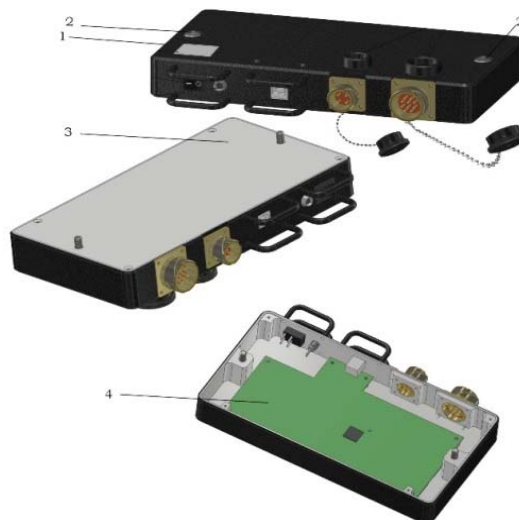


Рисунок 2 – БЭ СОВА:

1 – корпус; 2 – винты крепления к ПН; 3 – экран; 4 – печатная плата

БЭ СОВА во взаимодействии с управляющим компьютером (УК) обеспечивает:

- Управление работой СОВА-2-426 с помощью специального программного обеспечения (СПО);
- Точность наведения полей визирования установленной аппаратуры не более $0,2^\circ$;
- Управление съемочной аппаратурой по интерфейсу *USB 2.0*;
- Управление приводами и получение информации с датчиков углов поворота;
- Формирование питающих напряжений от бортовой сети для систем сканирования ПН-2-426;

– Гальваническую развязку цепей питания контроллеров БЭ СОВА и приводов от бортового питания от 23 до 29 В.

СОВА-2-426 с установленной съемочной аппаратурой – фотоаппаратом *Nikon* (а), НА ВСС (б) и объективом *Nikon AF-S* (в) изображена на рисунке 3.

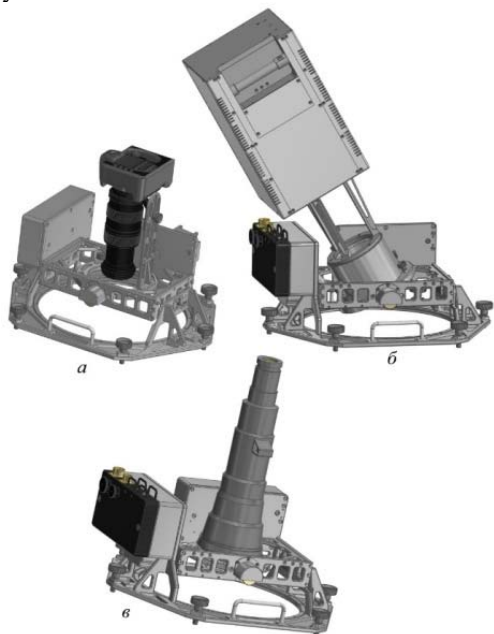


Рисунок 3 – СОВА-2-426 со съемочной НА:
а – с фотоаппаратом *Nikon*; б – с НА ВСС;
в – с объективом *Nikon AF-S*

УК предназначен для управления работой СОВА-2-426 с помощью СПО и обеспечивает выход из спящего режима фотоаппаратуры, установленной на ПН-2-426, подачей команды на контроллер управления ПН-2-426 по интерфейсу *USB 2.0* по заданному временному алгоритму с точностью не ниже 1 с и обработку приводами углов наведения по командам оператора или по заранее установленной программе наведения. В качестве УК используются бортовые лэптопы, входящие в информационно-управляющую систему (ИУС) СМ, с предустановленным СПО ПН СОВА.

СПО предназначено для управления и контроля СОВА-2-426. Выполняет расчет времени пролета над объектом исследования (с учетом допустимых углов съемки) и параметров наведения на объект в реальном времени; учитывает нахождение станции над дневной/ночной стороной; обеспечивает одновременную работу с несколькими объектами, ручной ввод географических координат объекта, автоматическое включение и наведение НА, сохранение/загрузку объектов на жесткий диск.

Литература

1. *Беляев Б.И.* Система автоматической ориентации научной аппаратуры в эксперименте «Ураган» на Международной космической станции / *Беляев М.Ю., Боровихин П.А., Голубев Ю.В., Ломако А.А., Рязанцев В.В., Сармин Э.Э., Сосенко В.А.* // *Космическая техника и технологии.* – 2018. – № 4(23). – С. 70–80.

УДК 621.373.826

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА Nd:YAG

Ватутина В.Е.¹, Кисель В.Э.², Орехов К.А.¹

¹ОАО «Пеленг»

Минск, Республика Беларусь

²НИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ

Минск, Республика Беларусь

На сегодняшний день широко распространено применение твердотельных лазеров в системах измерения дальности. В случае применения излучателя в составе дальномера на борту средних и крупных беспилотных летающих аппаратов, помимо габаритов и выходных пространственных и энергетических параметров, одной из основных характеристик является его способность функционировать в условиях постоянного воздействия вибраций и в широком диапазоне изменяющихся температур.

В статье рассмотрено моделирование лазерного излучателя на основе кристалла Nd:YAG для систем измерения дальности с длиной волны излучения 1 064 нм, энергией выходного излучения не менее 100 мДж и расходимостью не более 1,5 миллирадиан, работающего в режиме моду-

ляции добротности в температурном диапазоне – 40 °С–+50 °С с частотой 5 Гц с минимальными габаритами. Были описаны расчеты выходной энергии лазерного излучателя, профиля поглощения излучения, а также была проведена оценка поляризационных потерь в резонаторе и расходимости излучения.

Для снижения негативного воздействия окружающей среды приводящего к смещению взаимного положения лазерных оптических компонентов возможно применение ряда конфигураций резонатора, например на основе призм Порро, [1], а также резонаторов неустойчивой области с GRM-зеркалами [2].

В статье рассмотрен резонатор, аналогичный представленному в [3], эквивалентный плоскому, состоящий из полупрозрачного выходного и глу-

ного зеркал на общей подложке и трипель-призмы, представленный на рисунке 1.

В верхнем плече резонатора расположен электрооптический затвор, работающий в четвертьволновой схеме, в нижнем плече расположен квантрон и пластина $\lambda/4$, компенсирующая фазовые искажения лазерного пучка из-за проходов через трипель-призму. В выбранной схеме резонатора используется минимальное количество оптических компонентов, и с целью снижения рисков отказа излучателя во время работы лазерное излучение не падет на ребра трипель-призмы.

Несмотря на то, что компенсирующая фазовая пластина позволяет избежать поляризационных потерь в случае идеальной юстировки, выбранный резонатор будет иметь некоторые поляризационные потери в результате механической разъюстировки и изменений температуры среды. Существует несколько основных факторов, приводящих к вредным поляризационным потерям на поверхности поляризатора с стороны призмы:

1. Погрешность юстировки поляризатора, компенсирующей пластины $\lambda/4$, трипель-призмы вокруг оси резонатора

2. Изменение набег фаз пластины $\lambda/4$ в результате изменения температур

Было принято, что влияние изменений коэффициента отражения s-поляризации от поляризатора, юстировки оптических компонентов под углом к оси резонатора ($0,5^\circ$), а также свойств кристалла Nd:YAG и показателя преломления материала призмы в результате изменений температур ($\Delta n = 0,001$) пренебрежимо мало и может не учитываться в расчетах.

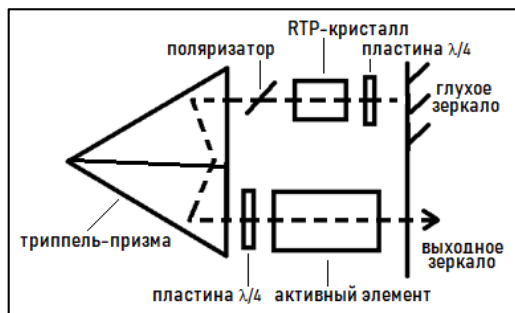


Рисунок 1 – Принципиальная схема резонатора лазерного излучателя

Оценка максимальной величины поляризационных потерь проводилась матричным методом Джонса для типичных значений величин разъюстировки оптических элементов вокруг своей оси, равных $0,5^\circ$, а также типичных значений температурного коэффициента пластин $\lambda/4$ нулевого порядка $\Delta n/\Delta T = 1 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Для диапазона температур $-40 \text{ } ^\circ\text{C} \text{--} +50 \text{ } ^\circ\text{C}$ поляризационные потери с использованием компенсирующей фазовой пластины с учетом указанных разъюстировок составляют до 9 % в зависимости от взаимной

ориентации углов поворота трипель-призмы и поляризатора вокруг оси резонатора.

Если поляризатор расположен таким образом, что р-поляризация перпендикулярна плоскости резонатора, то для луча, падающего после поляризатора на призму с направлением отражений в ней по часовой стрелке при наблюдении с ее вершины, потери из-за изменений температуры минимальны и составляют не более 2,3 %, если острый угол α , отсчитываемый против часовой стрелки от прямой р-поляризации к прямой проекции ребра между первой и последней боковыми гранями призмы, на которых происходит отражение пучка, на плоскость основания, составляет $-30^\circ \text{--} 0^\circ$ или $90^\circ \text{--} 60^\circ$ (рисунок 2).

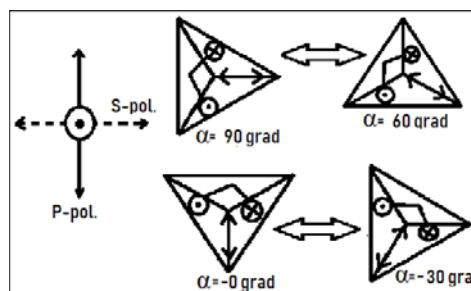


Рисунок 2 – Положения призмы, в диапазоне между которыми потери из-за изменения температуры минимальны (вид с вершины)

Диаметр лазерного пучка d , равный не менее 4.3 мм, определяется из формулы 1:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot E}{\pi \cdot W} \frac{1+R}{1-R} K_{nu} K_r}, \quad (1)$$

где W – лучевая стойкость оптических покрытий, типичное значение которой около 4 Дж/см^2 , $E = 100 \text{ мДж}$ – значение выходной энергии импульса лазерного излучения, S – площадь сечения лазерного пучка, $R = 0,2$ – коэффициент отражения выходного зеркала, $K_{nu} = 2$ – коэффициент для учета неравномерности профиля сечения пучка лазерного излучения, а также временного профиля лазерного импульса, $K_r = 2$ – коэффициент запаса лучевой плотности для изделия авиационного применения. Таким образом для цилиндрического активного элемента размер сечения равен 5 мм, при использовании защитной диафрагмы диаметр лазерного пучка равен 4,6 мм.

Мощность и длительность излучения накачки, а также оптимальный коэффициент отражения глухого зеркала и выходные энергетические параметры рассчитывались согласно [4]. Значения параметров, использованных при расчете, представлены в таблице 1. Расчетная мощность поглощенного излучения накачки длительностью 230 мкс составляет около 2 600 Вт для выходной энергии 100 мДж, расчетная длительность импульса равна 6 нс.

Таблица 1 – Значения входных параметров для расчёта энергетических характеристик лазерного излучения

Параметр	Значение
Длина волны излучения накачки	804–810 нм
Сечение вынужденного излучения Nd:YAG	$2,8 \cdot 10^{-23} \text{ м}^2$
Время жизни верхнего лазерного уровня	230 мкс
Квантовая эффективность перехода 0-2	0–87
Концентрация ионов Nd, м^{-3}	$0,9 \cdot 1,38 \cdot 10^{26}$
Показатель преломления Nd:YAG	1–816
Длина накачиваемой области активного элемента	80 мм
Длина резонатора	300 мм
Вредные потери в резонаторе за один обход	0,1

Квантрон является системой с поперечной диодной накачкой термостабилизированными матрицами лазерных диодов цилиндрического Nd:YAG активного элемента и диффузным отражателем эллиптической формы (рисунок 3).

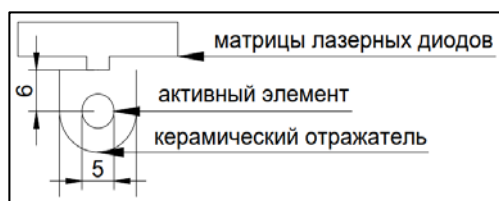


Рисунок 3 – Поперечное сечение системы накачки

КПД передачи излучения накачки равен от 48 до 51 % согласно расчётам, проведенным с использованием ПО Zemax. Следовательно, сум-

марная мощность излучения должна составлять не менее 5 200 Вт. Система накачки, представленная на рисунке 3, может быть реализована семью матрицами лазерных диодов номинальной мощностью 800 Вт. Из-за наличия термолинзы в активном элементе резонатор является устойчивым. Расходимость излучения определяется модовым составом резонатора, ограниченного защитной диафрагмой активного элемента. Величина усредненной термолинзы оценивалась согласно п. 7.1 [4] и равна около 54 м. Величина расходимости лазерного излучения оценивалась методом матричной оптики согласно п. 2.5, 5.2 [5]. Радиус нулевой поперечной моды составляет около 1,04 мм, максимальный порядок поперечных мод не более 4 для случая Эрмитт-Гауссова пучка, расчетная расходимость лазерного излучения равна не менее 1,3 мрад.

Проведенные расчеты показывают один из способов реализации компактного лазерного излучателя с габаритом не более $200 \times 100 \times 50$ мм для применения в системах измерения дальности при воздействии перепада температур и вибраций.

Литература

1. Athermal, Lightweight, Diode-Pumped, 1 micron Transmitter / J.C. McCarthy [et al.] // Proc. of SPIE. – 2016. – Vol. 5707. 0277-786X.
2. Space-qualified laser system for the BepiColombo Laser Altimeter / R. Kallenbach [et al.] // Applied Optics. – 2013. – Vol. 42, № 36. – P. 8732–8746.
3. A compact laser target designator / S.T. Lee [et al.] // Proc. of SPIE. – 2016. – Vol. 9834. 98340Q-1.
4. Solid-State Laser Engineering, 6th ed. / W. Koechner, Round Hill, USA: Springer, 2006. – 765 p.
5. Optical Resonators: fundamentals, advanced concepts and applications / N. Hodgson, H. Weber, London : Springer-Verlag London Ltd, 1997. – 666 p.

УДК 539.26, 538.958, 621.373.8

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА СИТАЛЛОВ ЦИНК-ГАЛЛИЙ-АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СОСТАВА

Глазунов И.В.¹, Маляревич А.М.¹, Юмашев К.В.¹, Дымшиц О.С.²

¹НИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ

Минск, Республика Беларусь

²НИТИОМ ВНИЦ «ГОИ имени С.И. Вавилова»

Санкт-Петербург, Российская Федерация

Источники импульсного лазерного излучения для спектральной области $\sim 1,5$ мкм находят широкое применение в системах локации и зондирования атмосферы. Трехвалентные ионы эрбия (Er^{3+}) обеспечивают лазерную генерацию на переходе ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ в этой условно безопасной для глаз области спектра [1]. Для генерации импульсного излучения наносекундной длительности в лазерный резонатор обычно помещается нелинейный элемент – пассивный затвор на основе насыщающегося поглотителя.

Это позволяет создать полностью твердотельную лазерную систему.

Двухвалентные ионы кобальта (Co^{2+}), расположенные в кристаллах в позициях с тетраэдрической симметрией локального окружения, характеризуются широкополосным поглощением в области длин волн 1,3–1,5 мкм [2]. Данная полоса связана с переходом ${}^4A_2({}^4F) \rightarrow {}^4T_1({}^4F)$ [3]. Тетраэдрическая координация ионов Co^{2+} обеспечивает высокие поперечные сечения поглощения из основного состояния и, следова-

тельно, небольшие значения плотности энергии насыщения в пределах данной полосы (около 1 Дж/см²). Это делает Co²⁺-содержащие материалы подходящими для модуляции добротности лазеров на ионах Er³⁺.

В последнее десятилетие большое распространение получили пассивные затворы из алюмосиликатных стеклокристаллических материалов (ситаллов), которые содержат наноразмерные кристаллы. Спектроскопические свойства ситаллов определяются свойствами как наноразмерных кристаллов, так и остаточного стекла. Хорошие термомеханические свойства ситаллов [4] обеспечивают высокие значения их лучевой стойкости.

В данной работе представлен ситалл на основе цинк-галлий-алюмосиликатного (далее ZGAS) состава, где в стеклообразной матрице синтезирована смешанная кристаллическая структура цинк-алюминиевых и галлий-алюминиевых шпинелей (рисунок 1).

Исходные стекла были вторично термообработаны при температурах 800 °С, 850 °С, 900 °С, 1000 °С. В результате термообработки получен ряд образцов сине-зеленого цвета.

На рисунке 2 представлены спектры люминесценции ситаллов, полученных в результате термообработки при температурах от 850 °С до 1000 °С. Возбуждение люминесценции осуществлялось облучением Хе-лампой, что соответствует переходу $^4A_2(^4F) \rightarrow ^4T_1(^4P)$ тетраэдрически координированных ионов Co²⁺.



Рисунок 1 – Изображения исходного стекла и прозрачной стеклокерамики, с указанием режима термообработки, (температура, °С/время, ч)

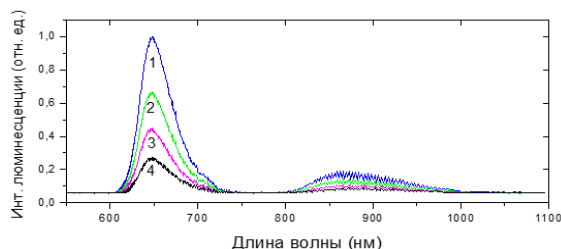


Рисунок 2 – Спектры люминесценции ситаллов, полученных методом вторичной термообработки при: 1000 °С (1), 950 °С (2), 900 °С (3), 850 °С (4). Длина волны возбуждения $\lambda = 532$ нм

Спектры типичны для тетраэдрически координированных ионов Co²⁺. Широкие полосы люминесценции с центрами 648 и 865 нм могут быть отнесены к разрешенным электродипольным переходам с термически заселенного уровня $^4T_1(^4P)$ [5]. Интенсивная полоса с максимумом при 648 нм связана с переходом $^4T_1(^4P) \rightarrow ^4A_2(^4F)$. Значительно более слабая полоса от 800 до 1000 нм относится к переходу $^4T_2(^4F)$. Несколько пиков, расположенных в области 690–720 нм, происходят от примесных ионов Cr³⁺, входящих в структуру шпинели в позициях октаэдрических ионов Al³⁺ [6].

Видно, что повышение температуры термообработки на стадии кристаллизации фазы шпинели не приводит к изменению формы спектра люминесценции, но приводит к увеличению интенсивности люминесценции, которую можно аппроксимировать линейной зависимостью (рисунок 3).

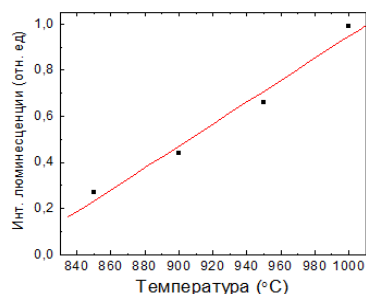


Рисунок 3 – Зависимость интегрального сигнала люминесценции от температуры в спектральном диапазоне 600–750 нм

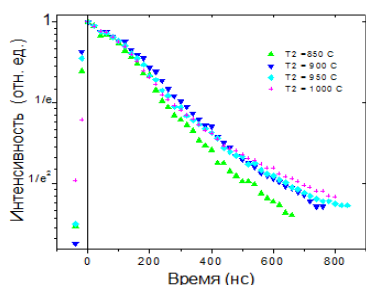


Рисунок 4 – Затухание интегрального сигнала люминесценции исследуемых ситаллов

На рисунке 4 показан интегральный сигнал затухания люминесценции ситаллов, полученных при различных температурах термообработки. Для всех образцов зависимость не моноэкспоненциальная, что можно объяснить наличием слегка искаженных позиций для ионов Co²⁺ на границе нанокристаллов со структурой шпинели. Оценены характерные времена затухания люминесценции как время спада до уровня 1/e, $\tau_{1/e}$. Характерные времена затухания люминесценции представлены в таблице 1. Результаты показывают, что значение $\tau_{1/e}$ остается постоянным (с учетом экспериментальной погрешности) при изменении температуры термообработки и составляет 260 ± 10 нс.

Таблица 1 – Времена затухания люминесценции для образцов стеклокерамики, приготовленных при различных температурах термообработки

Режим термообработки	Время затухания люминесценции, $\tau_{1/e}$, нс
720 °C/6 ч + 800 °C/6 ч	260±10
720 °C/6 ч + 850 °C/6 ч	280±10
720 °C/6 ч + 900 °C/6 ч	260±10
720 °C/6 ч + 1000 °C/3 ч	250±10

Новые цинк-галлиоалюмосиликатные ситаллы на основе нанокристаллов шпинели $Zn(Ga,Al)_2O_4$, легированные Co^{2+} , были получены традиционным методом закалки в расплаве с контролируемой кристаллизацией.

Изучены люминесцентные свойства данных материалов, а также получены характерные времена затухания люминесценции. Показано, что люминесцентные свойства ситаллов определяются в основном тетраэдрически координированными ионами Co^{2+} , расположенными в нанокристаллах $Zn(Ga,Al)_2O_4$ со структурой шпинели.

Литература

1. Karlsson G., Laurell F., Tellefsen J., Denker B., Galagan B., Osiko V., Sverchkov S. // Appl. Phys. B. 2002. – V. 75. – P. 41.
2. Yumashev K.V., Denisov I.A., Posnov N.N., Prokoshin P.V., Mikhailov V.P. // Appl. Phys. B. – 2000. – V. 70. – P. 179.
3. Papalardo R., Wood D.L., Linares R.C., Jr. // J. Chem. Phys. – 1961. – V. 35. – P. 2041.
4. Holand W., Beall G.H. Glass Ceramic Technology, 2nd Edition. Wiley, 2012. – 440 p.
5. I.A. Denisov, Yu.V. Volk, A.M. Malyarevich, K.V. Yumashev, O.S. Dymshits, A.A. Zhilin, U. Kang, K.-H. Lee, Linear and nonlinear optical properties of cobalt-doped zinc aluminum glass ceramics. J. Appl. Phys. 93 (7) (2003) 3827-3831.
6. P. Loiko, A. Belyaev, O. Dymshits, I. Evdokimov, V. Vitkin, K. Volkova, M. Tsenter, A. Volokitina, M. Baranov, E. Vilejshikova, A. Baranov, A. Zhilin, Synthesis, characterization and absorption saturation of $Co:ZnAl_2O_4$ (gahnite) transparent ceramic and glass-ceramics: A comparative study, J. Alloys Compnd 725 (2017) 998-1005.

УДК 621.375.826

СИНТЕЗ И СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ

$Er:Y_2O_3$ И $Er:YAG$

Горбаченя К.Н.¹, Кисель В.Э.¹, Лопухин К.В.², Балашов В.В.², Федин А.В.³, Герке М.Н.³, Кулешов Н.В.¹

¹НИИ «Оптических материалов и технологий» БНТУ
Минск, Республика Беларусь

²Фрязинский филиал института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН
Фрязино, Российская Федерация

³Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
Владимир, Российская Федерация

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к разработке и созданию лазеров, работающих в условно безопасном для глаз спектральном диапазоне 1.5–1.6 мкм, в том числе для лазерных локаторов беспилотного транспорта. Однако до сих пор актуальным вопросом является поиск эффективной лазерной среды, обеспечивающей возможность получения лазерной генерации с высокой средней выходной мощностью. На сегодняшний день основными эрбиевыми материалами остаются фосфатные стекла, характеризующиеся малой теплопроводностью (~ 0,85 Вт/м*К), что ограничивает их применение в мощных лазерах. В настоящее время внимание исследователей смещается на материалы, которые обеспечивают сочетание спектроскопических характеристик, необходимых для получения эффективной лазерной генерации, и высокой теплопроводности матриц (> 3 Вт/м*К). Применение таких активных сред в дальнейшем позволяет создавать лазеры, генерирующие излучение с высокой средней выходной

мощностью (> 1 Вт) в непрерывном и импульсном режимах, для применения в лазерной дальнометрии, медицине, системах оптической локации и лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии.

Появление доступных источников накачки – лазерных диодов на основе соединений $InGaAsP/InP$, излучающих в области 1,5 мкм, с приемлемыми пространственными и спектральными характеристиками пучка вызвало повышенный интерес исследователей к изучению генерационных характеристик материалов, активированных только ионами Er^{3+} , при резонансной накачке непосредственно на верхний лазерный уровень $^4I_{13/2}$. В этом случае тепловыделение из-за малой относительной разности энергий квантов накачки и генерации сводится к минимуму. Открывается возможность применения материалов с низкой эффективностью переноса энергии от ионов иттербия к ионам эрбия в качестве активных сред лазеров спектрального диапазона 1,5–1,6 мкм. Ранее сообщалось о получении ла-

зерной генерации с резонансной накачкой на основе различных эрбийсодержащих оксидных материалов, таких как кристаллы гранатов YAG, ванадатов ReVO_4 ($\text{Re}=\text{Y}, \text{Gd}$) и полупрозрачных оксидов Re_2O_3 ($\text{Re}=\text{Sc}, \text{Lu}$) [1–4]. Группа редкоземельных полупрозрачных оксидных кристаллов $\text{Er}:\text{Re}_2\text{O}_3$ ($\text{Re}=\text{Sc}, \text{Lu}$) характеризуется наибольшим значением теплопроводности из рассматриваемых кристаллов ($\sim 12,6$ Вт/м \times К для кристалла $\text{Er}:\text{Lu}_2\text{O}_3$). При использовании кристалла $\text{Er}:\text{Sc}_2\text{O}_3$ получен непрерывный режим генерации с дифференциальной эффективностью до 45 % [4]. Однако основным недостатком полупрозрачных оксидных кристаллов является технологическая сложность их роста – температура плавления для указанных кристаллов составляет 2400 °С. Одним из решений описанных проблем, связанных с ростом кристаллов, является применение оптической керамики на основе указанных кристаллов. Современная технология изготовления оптической керамики позволяет получать материалы больших размеров с оптическим качеством, как правило, не уступающим по качеству соответствующим монокристаллам. Кроме того, стоимость изготовления оптической керамики существенно ниже роста монокристаллов, что в конечном итоге приводит к уменьшению себестоимости лазера.

Исследованные образцы керамики $\text{Er}(0,5 \text{ ат.}\%):\text{YAG}$ были изготовлены методом реактивного спекания в вакууме. Для этого были взяты коммерчески доступные порошки Y_2O_3 , Al_2O_3 и Er_2O_3 . В качестве спекающих добавок были использованы SiO_2 и V_2O_5 . Порошки были смешаны в стехиометрических пропорциях и помолоты в планетарной мельнице в среде безводного спирта в течение 15 часов, а потом высушены и протерты через сито. После протирки порошки были отожжены при 1 000 °С для удаления органики. Полученные порошки были отпрессованы сначала одноосным прессованием при 100 МПа в стальной форме диаметром 10 мм или при 20 МПа в стальной форме диаметром 27 мм, а потом в изостатическом прессе при 250 МПа в течение 5 минут. После первого этапа прессовки компакты были отожжены при 600 °С, а после 2-ого этапа при 800 °С для окончательного удаления всех летучих примесей. Полученные компакты были спечены в вакуумной печи с вольфрамовыми нагревателями при температуре 1 750 °С в течение 21 часа. После спекания образцы были отожжены при 1 100 °С в течение 36 часов для удаления кислородных вакансий. Образцы $\text{Er}(0,5 \text{ ат.}\%):\text{Y}_2\text{O}_3$ были изготовлены по аналогичной технологии. В качестве спекающих добавок использовались La_2O_3 (0,5 ат.%) и ZrO_2 (1,5 ат. %). Спекание проводилось при температуре 1860 °С в течение 10 часов. Отжиг после спекания проводился при температуре

1400 °С в течение 15 часов. Все отжиги проводились в воздушной атмосфере. После финального отжига образцы были отполированы. На рисунке 1 приведены фотографии синтезированных образцов оптической керамики $\text{Er}:\text{Y}_2\text{O}_3$ и $\text{Er}:\text{YAG}$.

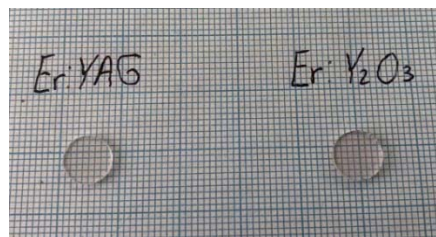


Рисунок 1 – Оптическая керамика $\text{Er}:\text{Y}_2\text{O}_3$ и $\text{Er}:\text{YAG}$

Измерение абсорбционных свойств оптической керамики $\text{Er}:\text{Y}_2\text{O}_3$ и $\text{Er}:\text{YAG}$ производилось при комнатной температуре на двухлучевом спектрофотометре Varian CARY 5 000 в спектральной области 1 400–1 700 нм, соответствующей энергетическому переходу $^4\text{I}_{15/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$ ионов эрбия. Спектральное разрешение прибора составляло 0,5 нм. При определении коэффициентов поглощения было учтено френелевское отражение от полированных поверхностей образцов. По спектрам коэффициентов поглощения и содержанию ионов-активаторов были определены спектры поперечных сечений поглощения.

На рисунке 2 представлены спектры поперечных сечений поглощения оптической керамики $\text{Er}:\text{Y}_2\text{O}_3$.

Максимальное поперечное сечение поглощения составляет $2,1 \cdot 10^{-20}$ см 2 на длине волны 1 535 нм. Значение поперечного сечения поглощения на длине волны 1 531 нм, на которой излучает источник накачки, который планируется использовать при проведении лазерных экспериментов и исследовании генерационных характеристик, составляет $0,42 \cdot 10^{-20}$ см 2 .

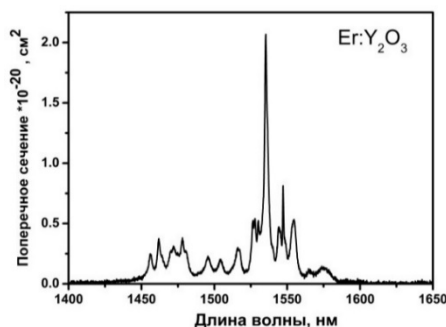


Рисунок 2 – Спектры поперечных сечений поглощения оптической керамики $\text{Er}:\text{Y}_2\text{O}_3$

На рисунке 3 представлены спектры поперечных сечений поглощения оптической керамики $\text{Er}:\text{YAG}$.

Значение поперечного сечения поглощения на длине волны 1 531 нм составляет $0,4 \cdot 10^{-20}$ см 2 .

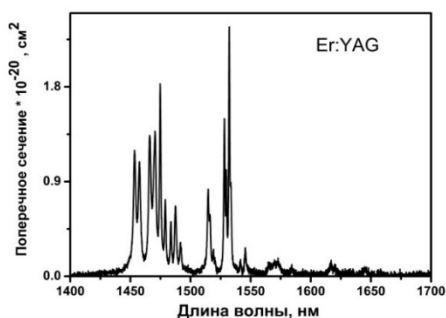


Рисунок 3 – Спектры поперечных сечений поглощения оптической керамики Er:YAG

Литература

1. D. Garbuzov, I.Kudryashov, M. Dubinskii «Resonantly diode laser pumped 1.6- μm -erbium-doped yttrium aluminum garnet solid-state laser». Appl. Phys. Lett. – Vol. 87, № 12, 131115-131118 (2005).
2. N. Ter-Gabrielyan [et al.] «Nearly quantum-defect-limited efficiency, resonantly pumped, $\text{Er}^{3+}:\text{YVO}_4$ laser at 1593.5 nm». Opt.Lett. Vol. 36, № 7, 1218–1220 (2011).
3. L.D. Merkle [et al.] «Er:Lu₂O₃ – laser-related spectroscopy». Opt. Mat. Express. Vol. 3, № 11, 1992–2002 – (2013).
4. N. Ter-Gabrielyan [et al.] «Ultralow quantum-defect eye-safe Er:Sc₂O₃ laser». Opt. Lett. Vol. 33, № 13, 1524–1526 (2008).

УДК 621.315.592

ДИФфузионные процессы в германий-кремниевых гетероструктурах при импульсных лазерных воздействиях

Гацкевич Е.И.¹, Ивлев Г.Д.², Гундина М.А.¹

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Одна из актуальных проблем полупроводниковой оптоэлектроники - создание эффективных источников света на основе германия, излучающих при комнатной температуре в ближней инфракрасной (ИК) области ($\lambda = 1,5\text{--}1,6$ мкм). На основе гетероструктур Ge/Si была получена лазерная генерация при оптической и электрической накачке [1, 2]. Твердые растворы $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ с задаваемой параметром «х» шириной запрещенной зоны применяются при создании различных микро- и оптоэлектронных приборных структур. Однако эффективность таких лазерных структур пока остается сравнительно низкой, а методы их создания (например, сверхвысоковакуумная молекулярно-лучевая эпитаксия) усложняют кремниевую технологию. Требуется поиск альтернативных методов создания $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ слоев, совместимых с кремниевой планарной технологией. Таким методом может быть импульсная лазерная обработка (ИЛО). Эффекты ИЛО различных германий кремниевых структур в наносекундном диапазоне длительностей воздействующего излучения исследовались в ряде работ [3]. При импульсных воздействиях на гетероструктуры и твердые растворы происходит перераспределение элементного состава. В настоящей работе изучено перераспределение элементов по глубине в Ge/Si гетероструктурах (ГС) при ИЛО методом вторично-ионной масс-спектропии.

В качестве объектов исследования использовались Ge/Si ГС, приготовленные вакуум-термическим напылением германия на подложку Si(100). Толщина аморфной плёнки германия составляла 70 нм. Исследуемые образцы облучались пучком рубинового лазера (длительность импульса 70–80 нс по уровню 0,5) с заданными

плотностями энергии W при неоднородности её распределения не выше $\pm 5\%$ по облучаемой зоне диаметром 3–4 мм. Одновременно проводилось оптическое зондирование зоны ИЛО на $\lambda_1 = 0,53$ и/или $\lambda_2 = 1,06$ мкм путём детектирования отражённого от неё пробного пучка. Источником зондирующего излучения являлся лазер на стекле, активированном неодимом, работающий в режиме свободной генерации – генерации «гладкого» импульса длительностью 0,5 мс. Оба лазера работали в режиме взаимно синхронизированных одиночных вспышек. Величина плотности энергии облучения W для изучения влияния ИЛО на перераспределение элементного состава варьировалась калиброванными нейтральными фильтрами от 0,25 до 4 Дж/см².

ВИМС-измерения проводились на установке TOF.SIMS-5 с времяпролётным масс-анализатором и двумя ионными пушками – для распыления и зондирования, на которой ранее авторами работ [4, 5] выполнялись исследования подобных германий – кремниевых структур. Данные ВИМС, были получены послойным анализом ГС при распылении тестируемой области образцов (~ 1 мкм²) ионами Cs^+ с энергией 1 кэВ (ток пучка 70 нА) и зондировании ионами Bi^+ (25 кэВ, 1 нА). В процессе распыления регистрировались элементарные вторичные ионы Ge^- и Si^- , а также кластерные Ge_2^- , детектирование которых проводилось для выявления по известной методике [5] присутствия нанокластеров (наноостровков) германия в анализируемых слоях.

Как следует из данных, представленных на рисунке 1, вследствие ИЛО ГС при $W = 3,6$ Дж/см² формируется бинарная система $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ с параметром «х», уменьшающимся от

0,7 (поверхность ГС) до 0 примерно на глубине $d = 0,5$ мкм, при постоянстве ($x = 0,3$) в интервале $d = 30\text{--}80$ нм. Полученные зависимости указывают на отсутствие нанокластеров германия в основном объёме сформированного субмикронного слоя с параметром $x = f(d)$.

Типичный вид осциллограмм сигналов отражения зондирующего излучения показан на рисунке 2. По скачку отражательной способности $R(t)$ (методика проведения измерений описана в [6]), были определены порог плавления аморфной пленки и время существования жидкой фазы τ . Отражательная способность Ge/Si гетероструктуры с началом действия лазерного импульса резко возрастает до R расплава Ge, затем через 0,1 мкс падает до промежуточного минимума и выходит на пониженный квазистационарный уровень, сохраняющийся около 0,3 мкс, затем падает ниже исходного в связи с окончанием фазовых превращений. Видно, что начальное значение и конечное значение отражательной способности различаются. Это может быть объяснено тем, что в результате плавления при ИЛО произошло перераспределение элементного состава гетероструктуры и образование твердого раствора.

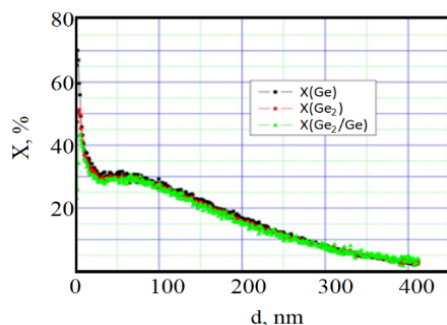


Рисунок 1 – Распределение германия по глубине в лазерно-модифицированной области гетероструктуры Ge/Si(100) при $W = 3,6$ Дж/см²; $X_{Si} = 1 - X_{Ge}$

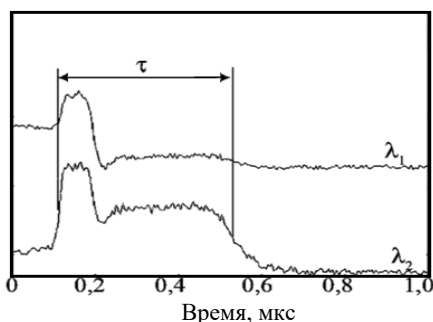


Рисунок 2 – Осциллограммы сигналов отражения зондирующего излучения $R(t)$ при ИЛО образцов Ge/Si(100)

С помощью зондирования зоны ИЛО можно определить время существования жидкой фазы, но нельзя получить данные о глубине плавления. Для анализа распределения температур по глу-

бине, а также глубин проплавления было проведено численное моделирование лазерно-индуцированных в Ge/Si образцах фазовых превращений плавление ↔ отвердевание. Численное моделирование лазерно-индуцированных фазовых переходов в исследуемых ГС проводилось по методике, описанной в [7], для ситуации максимально приближенной к экспериментальной. Рассматривалось тепловое воздействие импульсов излучения рубинового лазера длительностью 80 нс с однородным распределением плотности энергии по области облучения с описанием происходящих при этом процессов плавление – отвердевание на основе численного решения задачи Стефана. Для рассматриваемых экспериментальных условий длина тепловой диффузии за время импульса существенно меньше диаметра лазерного пятна (4 мм) на образце толщиной 0,35 мм, что позволяет ограничиться одномерным приближением. Сравнение с экспериментальными данными показало разумное согласие расчётных и экспериментальных данных по времени существования жидкой фазы. Согласно данным моделирования при плотности энергии 3,6 Дж/см² облучения глубина проплавления достигает более 1 мкм, что существенно превышает толщину аморфной плёнки. При этом длительность фазы плавления достигает несколько микросекунд. Наблюдаемое экспериментально перераспределение Ge в гетероструктуре обусловлены субмикросекундными диффузионными процессами (Ge и Si), происходящими в расплавленном слое, толщина которого существенно превышает толщину исходной плёнки аморфного германия.

Методом ВИМС получены данные, характеризующих распределение элементов по глубине в Ge/Si гетероструктурах, модифицированных под действием моноимпульсного излучения рубинового лазера. На основе численного моделирования дана интерпретация установленных особенностей перераспределения германия и кремния в исследуемых ГС в условиях наносекундного воздействия лазерного излучения, инициирующего фазовые превращения плавление – отвердевание с сопутствующими жидкофазными процессами массообмена.

Литература

1. Ge-on-Si lasers for large-scale electronic-photonic integration / J. Liu, L.C. Kimerling, J. Michel // *Semicond. Sci. Technol.*, 2012, vol. 27, no. 9, pp. 094006(13).
2. Room-temperature electroluminescence from tensile strained double-heterojunction germanium pin LEDs on silicon substrates / M. Kaschel [et al.] // *Solid-State Electron.*, 2013. – Vol. 83. – Pp. 87–91.
3. Структура и фотопроводимость эпитаксиальных слоев SiGe/Si, модифицированных моноимпульсным лазерным облучением / Г.Д. Ивлев [и др.] // *Письма в ЖТФ.* – 2014. – Т. 40, № 23. – С. 6–14.

4. Количественная калибровка и послойный анализ концентрации германия в гетероструктурах Ge_xSi_{1-x}/Si методом вторично-ионной масс-спектропии / М.Н. Дроздов [и др.] // ФТП. – 2014. – Т. 48, № 8. – С. 1138–1146.

5. Новый подход к диагностике наноструктур в гетероструктурах Ge_xSi_{1-x}/Si методом вторично-ионной масс-спектрометрии / М.Н. Дроздов [др.] // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т. 40, № 14. – С. 36–46.

6. Оптическая диагностика лазерно-индуцированных фазовых превращений в тонких пленках

германия на кремнии, сапфире и кварце / Г.А. Новиков [и др.] // ЖТФ. – 2015. – Т. 85, № 3. – С. 89–95.

7. Моделирование лазерно-индуцированных процессов в пленках германия на полупроводниковых подложках / Е.И. Гацкевич, М.А. Гундина, М.А. Князев // Материалы IX-й Международной научно-практической конференции "Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам", Мозырь, 21–24 марта 2017 г. – Мозырь, МГПУ им. И.П. Шамякина, 2017. – С. 126–127.

УДК 004

ПРОФИЛЬ ЯРКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ВДОЛЬ ЛИНИИ

Гундина М.А., Кондратьева Н.А., Грузд Н.А.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Качественный контроль продукции выполняется автоматическими методами анализа изображения. При обработке изображений, полученных приборами, решается обширный круг задач, таких как улучшение качества изображений; измерение числовых характеристик; распознавание некоторых частей, сжатие изображений и др. Современные устройства формирования изображений позволяют решать комплекс технических и научных задач [1–3], требующих синтеза и анализа методов обработки, бинаризации, классификации изображений.

Развитие микроэлектроники позволяет повысить сложность применяемых алгоритмов для решения прикладных задач. В зарубежной и отечественной литературе [4–6] приводится большой класс алгоритмов обработки цифровых изображений, который может быть применен для решения задач производства, приводится набор вопросов сегментации, распознавания образов, описания и представления деталей, морфологического анализа изображения [5–6]. Однако они предназначены для решения научных задач. В то же время, существует необходимость в разработке алгоритмов, которые можно использовать в условиях производства и таких алгоритмов, которые будут интересны и полезны современным инженерам.

Для количественного анализа изображения как двумерного массива яркости часто используется одномерный профиль поверхностной яркости.

Под профилем изображения вдоль некоторой линии будем понимать функцию, характеризующую распределение яркости изображения вдоль этой линии.

В работе рассматривается разработанная программа, реализующая построение профиля изображения для последующей его сегментации.

Сегментация делит изображение на его составные части и объекты. Например, при осуществлении автоматического контроля при сборке узлов радиоэлектронной аппаратуры важно

уметь выявлять определенные дефекты изготавливаемых приборов, таких как отсутствие компонентов или наличие разрывов контактных дорожек на плате.

После того как одномерный массив значений яркости профиля сформирован, его анализ осуществляется стандартными компьютерными средствами и позволяет автоматически выделять различного рода особые точки функции профиля (определить резкое изменение цвета, контуры изображения).

Получение и анализ профиля вдоль линии используется в различных областях науки и техники. Например, анализ интенсивности свечения изображений, полученных тепловизором, позволяет получить данные об изображении, основываясь на значениях профиля яркости.

Профиль вдоль некоторой линии используется также для считывания штрихового кода изделия [7]. Поскольку метод кодирования сигнала в штриховых кодах заключается в определенной последовательности чередования штрихов и пробелов различной ширины, следовательно, профиль изображения содержит всю необходимую информацию для того, чтобы считать штриховой код.



Рисунок 1 – Пример штрихового кода

На профиле заметны промежутки постоянного значения яркости штрихи кода, а также положения начала и конца штриховой последовательности (границы объекта).

Построение профиля яркости используется при создании систем искусственного интеллекта, например, при анализе распознавания микропараметров клеточной структуры годовичных колец хвойных деревьев [8].

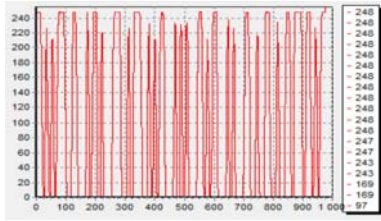


Рисунок 2 – Профиль изображения вдоль горизонтальной линии

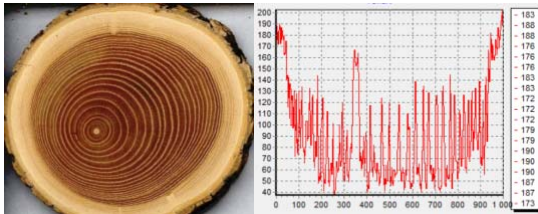


Рисунок 4 – Годовые слои древесины и его профиль вдоль линии центра колец

В микросистемной технике построение и анализ профиля яркости используется для количественного контроля дефектов поверхности кремниевых пластин. На основе него может быть сформированы изображения дефектов при контроле полупроводниковых пластин [9].

Анализ профиля вдоль линии позволяет получить данные о распределении яркости изображения вдоль произвольно нанесенной на изображение линии. График профиля в среде MATLAB показывает по оси X положения точек, а по оси Y измеренное значение яркости. Таким образом, по оси X представлена пространственная шкала, а по оси Y шкала в единицах измерения яркости в соответствии с текущей калибровкой. Линия, вдоль которой строится профиль, может иметь любую ориентацию и любую длину.

Главное меню программы содержит 4 пункта: загрузка, построение профиля для цветного изображения, перевод в полутоновое изображение и построение для него профиля.

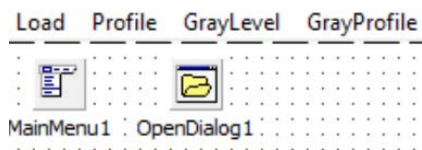


Рисунок 5 – Основные пункты главного меню

Загрузка изображения осуществляется следующим образом:

```
if OpenFileDialog1.Execute then
    Image1.Picture.LoadFromFile(
        OpenFileDialog1.FileName); bp:=TBitmap.Create;
    bp.Assign(image1.picture.Graphic);
    Image1.picture.Bitmap.Assign(bp);
```

Для построения линии, вдоль которой будет строиться профиль используются процедуры Image1.MouseDown, Image1.MouseUp, позволяющие обработать событие нажатия и снятие нажатия кнопки мыши.

Для перевода в полутоновое изображение используется пользовательская функция:

```
function
    RgbToGray(RGBColor:TColor):TColor;
var Gray:Byte;
begin
    Gray:=Round((0.3*GetRValue(RGBColor))+
    (0.59*GetGValue(RGBColor))+
    (0.11*GetBValue(RGBColor)));
    Result:=RGB(Gray,Gray,Gray);end;
```

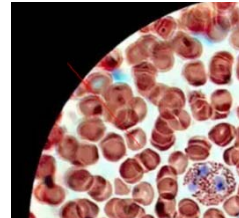


Рисунок 6 – Часть снимка крови и выбранная линия, вдоль которой будет строится профиль

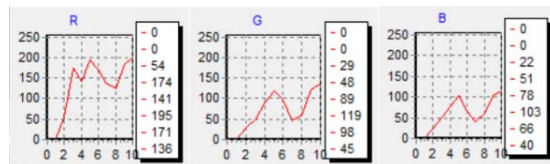


Рисунок 7 – Профиль снимка крови

Данная программа может быть использована для компьютерной диагностики кремниевых пластин для сегментации.

Литература

1. Breton V. The Healthgrid White Paper / V. Berton // Studies in Health Technology and Informatics. – 2005. – V. 112. – P. 249–318.
2. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов / М.М. Мирошников. – СПб.: «Лань», 2010. – 704 с.
3. Gonzalez R.C. Digital Image Processing / R.C. Gonzalez, R.E. Woods. New Jersey: Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002. – 797 p.
4. Bribiesca E. A chain code for representing 3-D curves / E. Bribiesca // Pattern Recog. – 2000. – Vol. 33, no. 5. – P. 755–765.
5. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
6. Рудаков П.И. Обработка сигналов и изображений. MATLAB 5.x / П.И. Рудаков, И.В. Сафонов. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. – 416 с.
7. Пахомов В.В. Использование современных технологий для учета движения товаров / В.В. Пахомов, В.В. Кугач // Вестник фармации. – 2005. – № 4 (30). – С. 3–14.
8. Скворцов С.Г. Разработка информационной системы анализа распознавания микропараметров клеточной структуры годовичных колец хвойных деревьев Магистерская диссертация, Красноярск, 2018. – 78 с.
9. Sen'ko S.F., Sen'ko A.S., Zelenin V.A., Puglachenko E.G. Russian Microelectronics. – 2003. – T. 32, № 3. – С. 165–171.

УДК 621.382.019.3

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СОСТАВА НА ЛЮМИСЦЕНЦИЮ ГЕТЕРОСТРУКТУР $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}/\text{InP}$ ($0,1 < x < 0,7$)

Манего С.А.¹, Груздев Ю.А.²¹Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

²Минский НИИ Радиоматериалов

Минск, Республика Беларусь

Одним из основных факторов, определяющих развитие опто- и микроэлектроники в настоящее время, является разработка принципиально новых приборов, обладающих уникальными свойствами на основе многокомпонентных твердых растворов соединений А^{III}В^V. Создание таких приборов основывается на получении качественных тонких эпитаксиальных слоев твердых растворов А^{III}В^V.

Особенно это важно для приборов содержащих активные области с характерными толщинами слоев, не превышающих 5–20 нанометров. Неоднородности в таких областях, как по толщине, так и по составу одной из компонент приводит к изменению области чувствительности и/или спектра излучения таких приборов, а также к формированию структурных дефектов в активной области полупроводникового прибора.

Поэтому, в связи с прикладными аспектами применения полупроводниковых приборов на основе твердых растворов $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}/\text{InP}$ становится актуальным изучение физико-технологических особенностей формирования эпитаксиальных слоев $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}$, возникновение дефектов и структурной неоднородности состава в эпитаксиальных слоях.

Эпитаксиальные слои (ЭС) арсенида-фосфида индия выращивались методом газотранспортной эпитаксии в гидридно-хлоридной системе на подложках фосфида индия. Толщина ЭС была (3–7) мкм. Спектры фотолюминесценции были получены при 4,2–300 К по стандартной методике с синхронным детектированием. Для возбуждения фотолюминесценции использовался аргоновый лазер ЛГН-401А. в качестве фотоприемника использовалось фотосопротивление из германия, легированного медью, охлаждаемый жидким азотом. Спектральное разрешение монохроматора было 2,88 нм/мм.

Исследование зависимости неоднородности эпитаксиальных слоев $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}/\text{InP}$ ($0,1 < x < 0,7$) от состава газовой фазы в зоне осаждения проводилось с помощью низкотемпературной фотолюминесценции и рентгеновской топографии.

Как видно из рисунка 1 с ростом парциального давления $P_{\text{PH}_3}^*$ степень неоднородности эпитаксиальных слоев увеличивается. Спектры фотолюминесценции ЭС, выращенных при больших значениях парциального давления неразложившегося гидрида фосфора ($P_{\text{PH}_3}^* = 6,2 \cdot 10^{-1}$ Па), состояли из нескольких полос, интенсивность которых

была сравнима друг с другом, что может быть обусловлено образованием макро неоднородных областей. Оценка размеров этих областей с помощью растрового электронного микроскопа BS-350 и рентгеновской топографии показала величины порядка (20–100) мкм. Уменьшение парциального давления неразложившегося гидрида фосфора уменьшало число этих полос, они перекрывались. Некоторые полосы имели достаточно малую величину полуширины на половине максимума ($\Delta E_{1/2} = 7,0\text{--}10$ мэВ, б).

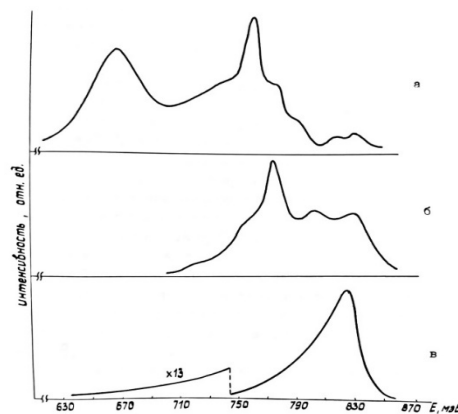


Рисунок 1 – Спектры фотолюминесценции эпитаксиальных слоев $\text{InAs}_{0,5}\text{P}_{0,5}$ ($T=4,2$ К), выращенных при различных парциальных давлениях фосфина $P_{\text{PH}_3}^*$:

$a - 6,2 \cdot 10^{-1}$ Па; $b - 2,9 \cdot 10^{-1}$ Па; $v - 2,9 \cdot 10$ Па

Размеры этих неоднородностей были (1–10) мкм. При малых величинах парциального давления неразложившегося гидрида фосфора ($P_{\text{PH}_3}^* \leq 2,9 \cdot 10^{-1}$ Па), образуются нано- и микро неоднородности равномерно распределенные по всему объему эпитаксиального слоя. Спектр фотолюминесценции эпитаксиальных слоев состоял из одной широкой полосы с затянутым длинноволновым краем.

На основании экспериментальных данных по структурному совершенству и характеристическим параметрам полос люминесценции эпитаксиальных слоев $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}$, содержащих как малые количества атомов мышьяка ($0 < x < 0,05$) [1], так и значительные его количества ($0,1 < x < 0,7$), видно, что величина парциального давления неразложившегося фосфина существенно определяет размеры и концентрацию неоднородных по составу областей.

Хлоридно-гидридная эпитаксия характеризуется использованием при синтезе твердых растворов гидридов элементов V группы и хлоридов элементов III группы таблицы Менделеева. Гидриды фосфора и мышьяка являются нестабильными при температуре эпитаксии 873–973 К, причем разложение гидридов фосфора идет медленнее, чем гидридов мышьяка. Поэтому при рассмотрении процесса эпитаксии на молекулярном уровне мы можем полагать, что концентрация неразложившихся молекул фосфина значительно превосходит концентрацию молекул арсина.

Для роста эпитаксиальных слоев необходима поставка к поверхности атомов водорода для удаления атомов хлора с поверхности роста. Процесс поставки атомов водорода осуществляется путем пиролиза молекул водорода, молекул фосфина и арсина. Так, при взаимодействии молекул фосфина с адсорбированными молекулами хлористого индия у поверхности роста, происходит гетерогенное разложение молекул фосфина и поставка атомов водорода к поверхности с последующим удалением атомов хлора с нее в виде молекул хлористого водорода. При этом мы имеем два процесса, у поверхности роста, разложение молекул фосфина и диссоциацию молекул водорода. Следует отметить, что скорость удаления атомов хлора с поверхности роста значительно превосходит скорость поставки атомов мышьяка и фосфора к ней. В силу статистического процесса взаимодействия молекул фосфина с поверхностью роста из-за различий в скорости поставки атомов мышьяка и фосфора к поверхности роста, а также скорости удаления адсорбированных атомов хлора имеется неоднородное распределение по поверхности металлических пятен индия. Термодинамический анализ показывает, что при температуре эпитаксии 873–893 К энергетически более выгодным является процесс захвата атомами индия атомов мышьяка, что приводит к преимущественному росту в местах образования пятен индия составов с большим процентным содержанием

атомов мышьяка. Данная модель позволяет объяснить формирование различных как по составу, так и по размерам микрообластей в эпитаксиальных пленках $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}/\text{InP}$ ($0,1 < x < 0,7$). Следует отметить, что, с увеличением парциального давления фосфина $P^* \geq 7,2 \cdot 10^2$ Па количество атомов фосфора над подложкой становится достаточно большим и вероятность их взаимодействия с атомами индия увеличивается, что приводит к формированию микроблочной структуры.

Морфологические исследования эпитаксиальных слоев $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}/\text{InP}$ ($0,1 < x < 0,7$), выращенных хлоридно-гидридной эпитаксией на подложках фосфида индия, показывают, что на поверхности образуется характерная морфологическая сетка. Гетероструктуры $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}/\text{InP}$, выращенные с переходным слоем более 1,0 мкм, обладали зеркальной поверхностью с характерной рельефной поверхностью и морфологической сеткой. Шаг морфологической сетки зависел от толщины переходного слоя и изменялся от 2,5 мкм для $d_{\text{пер.}} = 8$ мкм до 10 мкм для $d_{\text{пер.}} = 3$ мкм.

Металлографические исследования показывают, что дислокации расположены вдоль морфологической стенки, а их плотность для гетероструктур с толщиной переходного слоя 3 мкм составляла $5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$.

Таким образом, анализ спектров люминесценции гетероструктур $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}/\text{InP}$ ($0,1 < x < 0,7$) показал, что степень неоднородности состава твердого раствора $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}/\text{InP}$ зависит от парциального давления неразложившегося гидрида фосфора. Предлагается модель формирования неоднородных по составу и размерам микрообластей в эпитаксиальных слоях $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}/\text{InP}$ ($0,1 < x < 0,7$).

Литература

1. Быковский В.А. Особенности роста и излучательная рекомбинация эпитаксиальных слоев $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}$ ($0 < x < 0,05$), выращенных газовой эпитаксией на подложках InP / В.А. Быковский, С.А. Манего, В.И. Осинский // Журн. прикл. спектроскопии, 1990.– Т. 52, № 1. – С. 121–126.

УДК 624.94

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФАР ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ДЕТАЛЯМИ ВТОРИЧНОЙ ОПТИКИ

Балохонов Д.В.¹, Сернов С.П.¹, Коничева Л.М.²

¹Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

²ОАО «РУДЕНСК»

Марьина горка, Республика Беларусь

Существующие конструкции фар транспортных средств предусматривают использование в качестве источника света ламп или светодиодов. Распределение силы света фар строго задано международными Правилами ООН. Важнейшим элементом этого распределения является резкая светотеневая граница, выше которой свет фары

распространяться не должен, чтобы исключить вероятность ослепления водителей встречных транспортных средств и дорожно-транспортных происшествий.

Так как все современные источники света, которые по величине светового потока могут применяться в фарах (лампы накаливания, мощ-

ные светодиоды, многокристальные светодиоды и светодиодные матрицы) имеют достаточно широкое распределение силы света, то в фарах неизбежно применение деталей вторичной оптики.

Деталь вторичной оптики представляет собой оптический элемент для формирования заданного распределения силы света источника, который располагается на определенном расстоянии от источника света (порядка десятикратного размера его излучающей области). К таким деталям относят в основном рефлекторы и линзы.

Рефлекторы применяются почти во всех конструкциях фар. При этом в фарах на основе ламп накаливания рефлекторы изготовлены из тонкого металла или металлизированной пластмассы, что уменьшает массу фары и улучшает ее устойчивость к ударам и вибрации. У изделий этого типа коэффициент отражения со временем уменьшается в результате окисления металла рефлектора.

В светодиодных фарах комбинированной схемы (*BILED*) применение мощных светодиодов позволяет реализовать как ближний, так и дальний свет, а рефлектор представляет собой массивную деталь из алюминиевого сплава, которая работает как радиатор. Это определяет большую толщину стенок рефлектора, наличие ребер и крепления под вентилятор активного охлаждения, что существенно увеличивает массу рефлектора. При этом центр масс узла практически совмещен со светодиодом, а оптическая ось фары практически всегда не совпадает с механической осью рефлектора. В результате этого фары такой конструкции имеют низкую устойчивость к вибрации и при движении автомобиля возможен эффект «дрожания» пятна света на дороге, что отрицательно влияет на зрение и восприятие водителя в темное время суток. Кроме этого, на больших расстояниях это может вызвать «случайное» ослепление встречных водителей из-за колебаний автомобиля на небольших неровностях дороги, которое невозможно отследить, проверяя неподвижный автомобиль на ровной площадке.

Алюминий, из которого сделан рефлектор в фарах такой конструкции, склонен к окислению, и при длительной эксплуатации из-за этого уменьшается коэффициент отражения рефлектора.

В светодиодных фарах матричной системы (*Matrix Headlight* или *Pixel Headlight*) массивные рефлекторы применяются редко, но встречаются цифровые микрзеркальные устройства (*DMD, Digital micromirror device*), которые являются микромеханическим аналогом рефлекторов. Их масса и размеры достаточно малы, чтобы при жестком креплении не нарушать соосности оптической системы и не вызывать проблем из-за неизбежных вибрации. Эти рефлекторы изготовлены по технологии МЭМС из кремния, поэтому коэффициент отражения у них почти не зависит от времени.

Линзы представляют собой детали, работающие на пропускание. Их широко применяют как вспомогательные детали, так как основная роль по концентрации светового потока источника принадлежит рефлекторам.

В фарах с лампами накаливания линзу совмещают с рассеивателем, создавая поверхность по типу линз Френеля на внутренней его стороне. Это позволяет «довернуть» свет на нужный угол и осуществить локальную коррекцию распределения силы света источника. Такие линзы-рассеиватели делают из стекла или пластика по технологии штамповки или литья под давлением, так что их масса невелика, а прочность позволяет им выполнять функции корпусной детали.

В светодиодных фарах комбинированной схемы линзы играют значительную роль, так как эти фары работают по принципу проектора, причем в качестве проецируемого изображения выступает граница металлической шторки, располагаемой перед источником. Такие линзы изготовляют из высококачественного стекла или пластика по технологиям, позволяющим с большой точностью соблюсти форму поверхности линзы (как правило, это поверхности четвертого или более высоких порядков). Масса получаемой детали велика, и, будучи расположенной сравнительно далеко от центра тяжести, она способна существенно уменьшить устойчивость всей фары к вибрации. Шторка, присутствующая в фарах такой конструкции, также подвержена вибрации. Несмотря на небольшую массу, колебания шторки способны исказить светотеневую границу фары даже на стоящем транспортном средстве со включенным двигателем.

В светодиодных фарах матричной схемы массивные линзы являются основным элементом проекционной системы, но отсутствие массивного рефлектора позволяет создать устойчивую к вибрации конструкцию с центром тяжести внутри линзы, что обеспечивает надежность и срок службы изделия.

Таким образом, ключевыми механическими параметрами деталей вторичной оптики фар транспортных средств являются их масса и расстояние от центра тяжести фары, так как именно эти параметры влияют на устойчивость изделия к вибрации и определяют его надежность.

Следует отметить, что надежность фары не всегда определяется катастрофическим отказом источника света. Например, в случае светодиодных фар, возможны параметрические отказы, обусловленные деградацией светового потока, поскольку характеристики светодиодов зависят как от тока инжекции и температуры, так и от времени. В результате этого дорогостоящая фара может перестать удовлетворять требованиям ТНПА задолго до катастрофического отказа источника света.

Это же относится к вибрации, вызывающей смещение составляющих проекционной оптической системы деталей, когда фара светит, но ее распределение силы света отличается от заданного в ТНПА, в результате смещения тяжелой линзы.

Чтобы избежать указанных ситуаций и обеспечить устойчивость фар транспортных средств к вибрации и их надежность, предлагается использовать следующие рекомендации при конструировании фар транспортных средств:

1. Максимально облегчить конструкцию фары уже на этапе разработки путем использования полимерных и композитных деталей, где это возможно. Меньшая масса изделия в целом позволяет уменьшить силы, действующие на детали фары при вибрации.

2. Использовать единичные мощные светодиоды в качестве источника света. Такие светодиоды не только имеют сравнительно низкую потребляемую мощность, но и устойчивы к вибрации за счет своего малого размера, массы и отсутствия слабо закрепленных деталей (как, например, нить у лампы накаливания). Матричные светодиоды и многокристальные светодиоды применять нецелесообразно, так как управление каждым из пикселей такого светодиода требует как минимум микроконтроллера в фаре, а стандартом является использование бортового компьютера. Это не позволяет использовать такие фары на транспортных средствах без бортового компьютера.

3. Для концентрации светового потока источника вместо массивных рефлекторов параболической формы из металла использовать детали вторичной оптики по типу концентрирующих неизображающих охватывающих линз или ре-

флекторов из прозрачных диэлектриков, работающих по принципу полного внутреннего отражения. Это позволит избежать потерь светового потока, как на пропускание, так и на отражение (диэлектрики окисляются значительно меньше металлов), а также облегчить конструкцию за счет меньшей плотности диэлектриков по сравнению с металлом. Нагрев светодиода также уменьшится, так как весь световой поток будет расходоваться эффективно. Кроме того, за счет расположения такой линзы близко к светодиоду можно улучшить устойчивость к вибрации в отличие от фар типа BILED.

4. Для тонкой «доводки» светового распределения предлагается использовать тонкостенные рефлекторы из металла, причем толщина стенки рефлектора уменьшается к наружной поверхности фары. Это позволит сформировать резкую светотеневую границу не за счет точно определенного расстояния проекции края шторки, а путем исключения возможности распространения света выше заданного в стандарте направления. Малая масса таких рефлекторов повысит устойчивость фары к вибрации, а развитая поверхность улучшит ее охлаждение без применения активных систем охлаждения.

5. Определить место крепления светодиода на рефлекторе таким образом, чтобы обеспечить положение центра масс всей оптической системы рефлектор-светодиод-линза на оптической оси фары. Это позволит упростить юстировку фары и улучшить устойчивость к вибрации, а также потенциально упростит замену фары в сборе и использование фары на транспортных средствах разных размеров.

УДК 535:628.373.8,535:548

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОНИЧЕСКОГО СВЕТОВОГО ПУЧКА

Рыжевич А.А.^{1,2}, Балыкин И.В.^{1,2}, Хило Н.А.¹, Машенко А.Г.¹, Железнякова Т.А.²

¹Институт физики НАН Беларуси

Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет

Минск, Республика Беларусь

Введение. В [1] было показано, что небесселевы конические световые пучки могут эффективно преобразовываться в азимутально и радиально поляризованные световые пучки [2] и световые поля с винтовыми дислокациями волнового фронта (ВДВФ) [3], имеющие широкие перспективы для применения в оптической диагностике [4] и лазерной обработке материалов [2]. Настоящая работа посвящена исследованию свойств конических световых пучков, которые будет полезно знать при создании источников мощного лазерного излучения с этими особенностями.

Формирование конического светового пучка. Для формирования конического светового пучка использовалась оптическая схема на основе конической линзы (аксикона) (рисунок 1). Распределение интенсивности в коническом световом пучке исследовалось экспериментально и теоретически. Аксикон имеет угол δ при основании и формирует конический световой пучок с половинным углом конусности α . До расстояния z_w (длина зоны существования бесселева светового пучка (БСП)) конический световой пучок считается бесселевым, после прохождения этой

дистанции конический световой пучок принято считать небesselевым.

Для теоретического исследования распределения интенсивности в пучке, формируемом аксиконом, было использовано две модели – одна основана на геометрической оптике, другая – на волновой. Модель, выбранная для волнового расчета по своей природе является численной, поэтому требует задания однозначных граничных условий. В качестве такого условия предлагается следующее – поле, падающее на аксикон, представляет собой гауссов световой пучок. Пространственная составляющая поля в таком случае описывается как

$$E(r) = E_0 e^{-\frac{r^2}{w^2}}, \quad (1)$$

где E_0 – максимальное значение электрического поля, r – радиальная координата, w – полуширина по уровню $1/e$ для поля. Поляризация пучка не рассматривается, поэтому E_0 полагается скаляром равным 1. Временная составляющая поля также не рассматривается. Для интенсивности формула принимает вид

$$I(r) = I_0 e^{-\frac{2r^2}{w^2}}, \quad (2)$$

где I_0 – максимальное значение интенсивности, r – радиальная координата, w – полуширина по уровню $1/e^2$ для интенсивности. Для удобства I_0 полагается равным единице. В численном эксперименте были зафиксированы следующие значения: $w=2,5$ мм, $\lambda=0,633$ мкм. Пример диаметрального распределения интенсивности в световом поле, падающем на аксикон, приведен на рисунке 1.

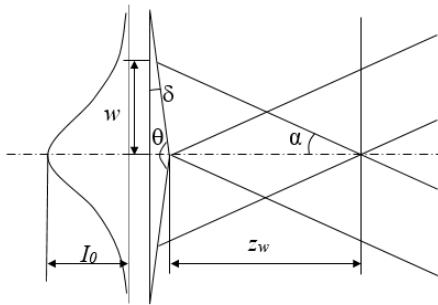


Рисунок 1 – Схема формирования конического светового пучка

Закономерности распространения конического светового пучка. На рисунке 2 показана зависимость пикового значения интенсивности на оси конического пучка от продольной координаты. Рассчитано расстояние z_K , равное $2,192 z_w$, на котором это значение становится равным I_0 . Именно на этом расстоянии уже допустимо располагать всевозможные преобразователи лазерного излучения на основе кристаллов,

чтобы лазерный пучок не разрушал их в области пикового значения интенсивности. На рисунке 3 проведено сравнение продольных распределений пиковых значений интенсивности в приосевом и основном кольцевом максимуме интенсивности.

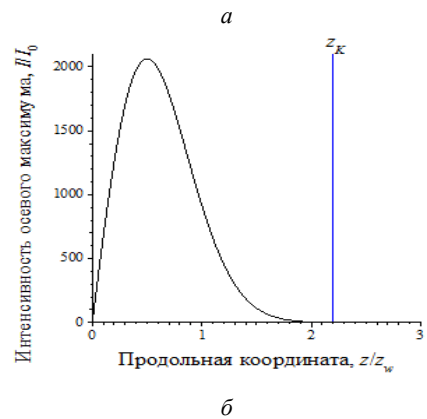
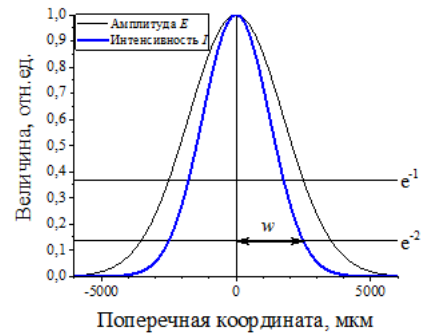


Рисунок 2 – а – диаметрально распределение электрического поля и интенсивности в падающем на аксикон гауссовом световом пучке (полуширина по уровню $1/e^2$ для интенсивности $w = 2 500$ мкм); б – Зависимость приосевой пиковой интенсивности от продольной координаты в коническом световом пучке

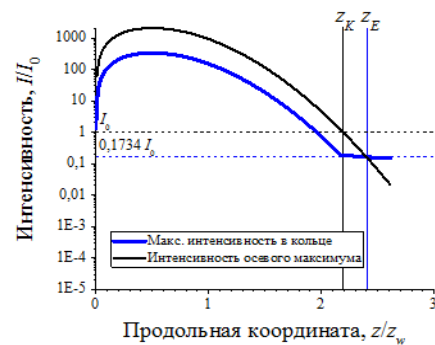


Рисунок 3 – Сравнение продольных распределений пиковых значений интенсивности в приосевом и кольцевом максимумах конического светового пучка

Из рисунка 3 следует, что существует расстояние z_E , на котором эти пиковые значения выравниваются. Это расстояние равно $2,393 z_w$. На рисунке 4 показаны диаметрально и поперечное распределение интенсивности в небesselевом световом пучке на дистанции z_K .

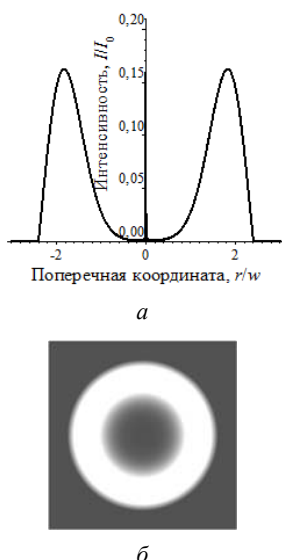


Рисунок 4 – Распределения интенсивности в небесселевом коническом пучке при равенстве пиковых значений интенсивности в осевом и основном кольцевом максимуме:

a – диаметрально; b – поперечное

Расстояние z_E соответствует полуширине исходного пучка по уровню $1,07 \cdot 10^{-5} I_0$, расстояние z_K – по уровню $6,72 \cdot 10^{-5} I_0$. Преобразователи излучения на основе кристаллов предпочтительно располагать на расстоянии z_E от аксикона.

УДК 548.571:535.343.2:658.562.3

СТЕНД ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ ТИТАНИЛ ФОСФАТА КАЛИЯ (КТР)

Митьковец А.И.¹, Рыжевич А.А.^{1,2}, Машенко А.Г.¹, Балькин И.В.^{1,2}, Варанецкий А.М.¹

¹ Институт физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

² Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Введение. В настоящее время одной из актуальных задач лазерной физики является определение параметров кристаллов, используемых для нелинейно-оптического преобразования частоты лазерного излучения.

Постановка задачи. Целью работы являлась разработка, изготовление и внедрение в технологический процесс выращивания и изготовления нелинейных кристаллов оптоэлектронного стенда для измерения коэффициентов преобразования частоты лазерного излучения нелинейными кристаллами КТР, лучевой стойкости кристаллов и их диэлектрических покрытий, оценки величины их нелинейной оптической неоднородности.

Описание стенда. Общий вид стенда представлен на рисунке 1. Конструкция стенда является сборной, переносной и представляет изделие единичного производства. Конструктивное

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания 1.1.01 (№ гос. регистрации 20160091) ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника» на 2016-2020 г.г. Для юстировки экспериментальной установки использовались результаты исследований по заданию 1.3.03 (№ гос. регистрации 20160092) этой же ГПНИ.

Литература

1. Рыжевич, А.А. Закономерности преобразования конических лазерных пучков в двуосном кристалле / А.А. Рыжевич, С.В. Солоневич, Н.А. Хило, И.В. Балькин // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2016. – № 1. – С. 107–116.
2. Khilo, N.A. A high-efficient method for generating radially and azimuthally polarized Bessel beams using biaxial crystals / N.A. Khilo, Turki S.M. Al-Saud, Soliman H. Al-Khowaiter, Muhanna K. Al-Muhanna, S.V. Solonovich, N.S. Kazak, A.A. Ryzhevich // Optics Communications. – 2012. – Vol. 285, № 24. – P. 4807-4810.
3. Belyi, V.N. Propagation of high-order circularly-polarized Bessel Beams and vortex generation in uniaxial crystals / V.N. Belyi, N.A. Khilo, N.S. Kazak, A.A. Ryzhevich, A. Forbes // Opt. Eng. – 2011. – Vol. 50, № 5. – P. 1-9.
4. Рыжевич, А. А. Оптические методы определения параметров плоских и цилиндрических поверхностей различного качества / А.А. Рыжевич, С.В. Солоневич, В.Е. Лепарский, А.Г. Смирнов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2015, спецвыпуск № 2. – С. 34–66.

исполнение стенда обеспечивает удобство эксплуатации, доступ ко всем его узлам и блокам, требующим регулирования и замены в процессе эксплуатации, и защищает содержимое блоков от попадания пыли и грязи.

Блок-схема стенда приведена на рисунке 2.



Рисунок 1 – Общий вид стенда

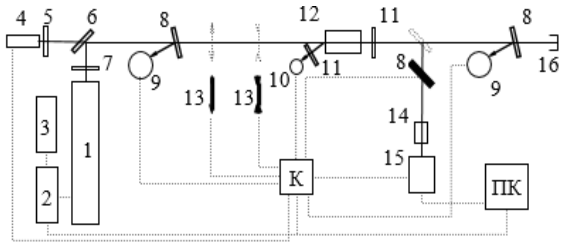


Рисунок 2 – Блок-схема стенда:

К – контроллер; *ПК* – компьютер;

- 1 – лазерный излучатель; 2 – блок питания; 3 – блок охлаждения; 4 – пилотный лазер; 5 – диафрагма; 6 – поворотное зеркало; 7 – вращатель поляризации; 8 – светоделительная пластинка; 9 – фотометрическая сфера; 10 – фотодиод; 11 – светофильтр; 12 – нелинейный кристалл; 13 – линза; 14 – объектив; 15 – CCD-камера; 16 – поглотитель

Источником зондирующего излучения служит лазерный излучатель (1) с длиной волны генерации 1,06 нм и длительностью импульса 7 нс, работающий в режиме модулированной добротности. Плоскость поляризации лазерного излучения вертикальная. Для возможности осуществления различных типов синхронизма в нелинейных кристаллах используется полуволновая пластинка (7). Поворотное зеркало (6) служит для совмещения оптической оси пилотного лазера (4) с оптической осью основного излучения. Измерение энергии основного излучения и излучения второй гармоники осуществляется фотометрическими сферами (9), сигнал на которые подается с помощью светоделительных пластинок (8). Фокусирующая и рассеивающая линзы (13) размещены на подвижных каретках, снабженных датчиками положения, и поочередно вдвигаются на оптическую ось стенда при проведении необходимого режима измерений. Нелинейный кристалл (12) крепится на предметном столике. Конструктивно столик состоит из держателя, устройства вертикального перемещения, устройства горизонтального перемещения, основания. Держатель имеет две угловые подвижки в вертикальной и горизонтальной плоскостях, позволяющих проводить предварительную юстировку кристалла (совмещение отражения пилотного лазера с выходным отверстием диафрагмы (5)). Фотодиод (10) с максимумом в чувствительности в ультрафиолетовой области спектра предназначен для регистрации вспышки пробоя при работе в режиме измерения лучевой стойкости. Объектив (14) формирует на светочувствительной матрице CCD-камеры (15) изображение интерференционной картины получающейся при облучении кристалла сильно расходящимся пучком основного излучения.

Работа стенда управляется контроллером (К) и условно разбита на три режима:

1. Измерение коэффициента преобразования: включается пилотный лазер (ПЛ), юстируется

кристалл. Включается лазер (пилотный лазер выключается), снимаются сигналы с фотометрических сфер и определяется их отношение.

2. Измерение лучевой стойкости: включается пилотный лазер, юстируется кристалл. На ось вдвигается фокусирующая линза (13), включается лазер (ПЛ выключается), повышается мощность до срабатывания фотодиода, подается звуковой сигнал, лазер выключается. Сохраняется значение величины сигнала с первой фотометрической сферы при поступлении сигнала с фотодиода (10).

3. Исследование нелинейной неоднородности:

Включается пилотный лазер, юстируется кристалл. На ось вдвигаются рассеивающая линза и поворотная пластинка (8), включается лазер (ПЛ выключается). CCD-камерой фиксируется распределение поля. Однородность нелинейного преобразования изучалась по методике основанной на анализе интерференционной картины волн второй гармоники (ВГ), генерируемой в кристалле КТР сильно расходящимся лазерным пучком. Исследование кристаллических пластинок, вырезанных перпендикулярно направлению синхронизма для генерации второй гармоники (ГВГ), проводилось на блоке анализа нелинейной оптической неоднородности (рис. 3.), основными узлами которого являлись одномодовый YAG:Nd³⁺ лазер (1), юстировочный He-Ne лазер (2), короткофокусная рассеивающая линза, предметный столик с кристаллом (4), с расположенной на нём двухкоординатной подвижкой, экран и система регистрации изображения (5).

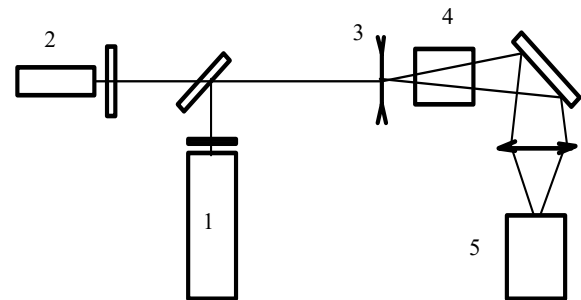
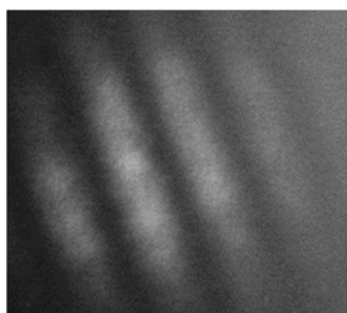


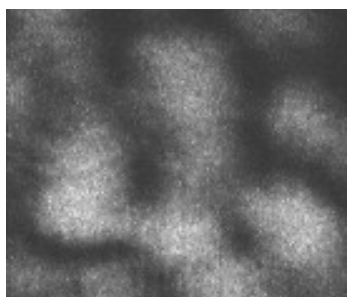
Рисунок 3 – Оптическая схема блока:

- 1 – лазерный излучатель;
2 – юстировочный He-Ne лазер;
3 – рассеивающая линза; 4 – предметный столик с кристаллом; 5 – CCD-камера

Точность измерения углов на стенде была не хуже нескольких угловых минут. На выходе из образца с высокой нелинейно-оптической однородностью, расходящийся луч второй гармоники образует на экране хорошо различимую двумерную картину чередующихся прямых или слегка изогнутых зелёных и тёмных контрастных полос (рисунок 4, а), которые можно наблюдать как справа, так и слева от главного (самого яркого) максимума ВГ.



а



б

Рисунок 4 – Фотографии волн ВГ при их генерации расходящимся пучком:

а – в образце кристалла КТР с высокой нелинейно-оптической однородностью;

б – в полидоменном образце

Благодаря высокой нелинейности в кристалле КТР толщиной 7 мм была возможна визуализация вторичных максимумов ВГ вплоть до восьмого. В случае прохождения расходящегося ИК лазерного луча через дефектную область кристалла, на экране наблюдается картина в виде искривлённых или разорванных полос или зелёных и чёрных пятен, а также уменьшается контраст между максимумами и минимумами

второй гармоники (рисунок 4, б). Аналогично тому, как искажение интерференционных полос позволяет оценивать линейную однородность, т.е. величину Δn , так искажение «полос второй гармоники» – локальные неоднородности тензора квадратичной нелинейной восприимчивости $\Delta\chi^{(2)}$.

В результате проведенных работ изготовлен и налажен экспериментальный образец оптоэлектронного стенда измерения параметров преобразователей частоты лазерного излучения, проведена калибровка системы регистрации изображения, проведены приемочные испытания стенда на соответствие требованиям ТЗ, стенд внедрен в технологический процесс завода РУП «Завод Оптик» г. Лида.

Изучение эффективности преобразования излучения во ВГ проводилось на образцах размером $5 \times 5 \times 7$ мм³ и $7 \times 7 \times 7$ мм³ изготовленных из кристаллов КРТ, выращенных как в высокоградиентном, так и низкоградиентном температурных полях. Предварительно кристаллы проходили отбраковку по наличию неоднородностей обоих типов, затем подвергались окончательной полировке и нанесению просветляющих покрытий. Возбуждение ВГ осуществлялось излучением YAG:Nd³⁺ лазера с длиной волны 1,064 мкм и плотность мощности излучения до 110 МВт/см². В кристаллах КТР, выращенных модифицированным методом Чохральского в режиме вынужденной конвекции, коэффициент преобразования достигал 55 % с гауссовым распределением поля по сечению пучка. При этом оказалось, что выход из одной були пригодных нелинейных элементов значительно выше, чем у кристаллов, выращенных в условиях высокого температурного градиента.

УДК 535.5, 53.082.5

SENSITIVITY VARIATIONS OF POLARIMETRIC CURRENT SENSORS ON TWIST AND SPUN FIBERS

Lovchy I.L.

JSC «Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering»
Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

Introduction. In the fiber optic current sensors (FOCS) the special twist and spun lightguides differing in polarizing parameters are used [1, 2]. Both lightguides are characterized by very strong internal birefringence (BR): the first – circular, the second – linear, with spiral structure. Existence of the strong ordered BR levels the influence of outer photo-elastic effects on the Faraday effect manifestation – the physical mechanism of measurement of current, but at the same time limits sensitivity of the sensor compared to the sensitivity of the sensor with the ideal isotropic lightguide in which only Faraday BR takes place.

1. Principles of modeling. To model the parameters of sensors the formalism of the Poincaré sphere was used. Modeling was carried out on the basis of analysis of change trajectory in the state of polarization (SOP) of light spreading along a sensitive fiber with varying parameters of lightguide, geometry of a fiber circuit, magnitude of magneto-optical (MO) effect [3, 4]. The lightguide was presented in the form of alternating sequence of extremely thin segments – linear (caused by built in or externally induced photo-elastic effects) and circular (caused by optical activity of twisted around the axis fiber or MO effect) phase plates. SOP change

after passing through each segment was defined by rotation of the initial position of polarization on the sphere by the angle of BR equal to the angle of phase shift of orthogonally polarized components, around the fast BR axis (an optical axis of the phase plate). From a fiber exit the light with changed according to MO and photo-elastic effects polarization state was speculatively divided by an analyzer – a polarizing divider, into two components, processing the intensities of which according to a certain algorithm made it possible to estimate the sensitivity of sensor in reality. In numerical calculations, we used the LabVIEW graphic programming medium.

2. Evolution of polarization in a twist fiber.

The polarization parameters of *twist* fiber are defined by the relative value of the τ spin of the fiber around axis and the bend radius R of the fiber in the circuit. The simplest in realization scheme of the sensor is the one with a single light bypass in the sensitive circuit. Trajectory of SOP change along the lightguide is represented on Poincare' sphere by a circle intersecting or touching the equator. [5]. At the same time the variety range of the SOP latitude depends on the orientation of the plane fiber coils in space relative to the direction of polarization of light at the input of the fiber and makes up from $-v$ – $+v$ to 0 – $\pm 2v$ where the angle of v is defined by formula:

$$v = \text{atan}(\beta_R/2\rho). \quad (1)$$

Where ρ is the induced optical activity of the twisted fiber, β_R – the difference between the phases of orthogonally polarized components of the linear BR caused by bending fiber in space when forming a sensitive circuit of the sensor ($\rho \approx 0,079\tau$ [6], $\beta_R \approx 0,005/R$ [7] – hereinafter the fused silica fiber with a diameter of 125 μm on the wavelength of 660 nm is used).

2.1 FOCS sensitivity with *twist* fiber. Results of modeling showed that at small MO angles of rotation average sensitivity η of FOCS with *twist* fiber is defined by the following formula:

$$\eta = \cos^2(\text{atan}(\beta_R/2\rho)). \quad (2)$$

When rotating the plane of the sensitive circuit of FOCS in space sensitivity variations relative to the average value are in the range $\pm\Delta\eta$:

$$\Delta\eta = 0,5\eta(\beta_R/2\rho)^2. \quad (3)$$

In figure 1 FOCS sensitivity modeling results (vertical arrays of points) at the rotation of lightguide circuit in space are presented for three radiuses of measuring circuit along with calculation results of sensitivity for formulas (2) and (3) (continuous and dotted curves) depending on fiber spin values. Range of rotation of circuit in space during modeling made 0–90 deg with an increment of 1 deg, fiber spinning increment – quarter spin per meter.

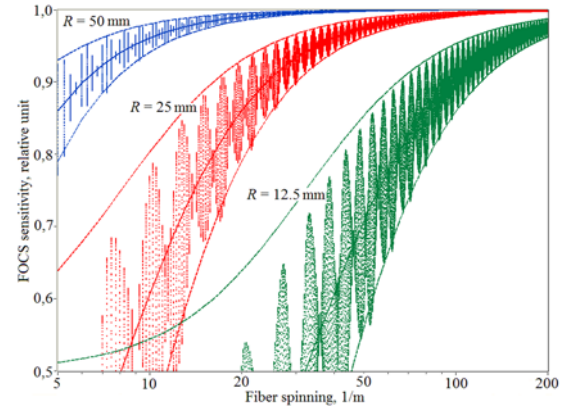


Figure 1 – FOCS sensitivity with *twist* fiber

At $2\rho \geq \beta_R/2$ results of calculation for formulas (2) and (3) fully correspond to sensitivity variations based on modeling and analysis of the SOP at the fiber exit.

3. The polarizing parameters of the *spun* fiber are determined by the length of beats of the built-in linear BR L_β and the length of rotation of its axis L_τ , and also the bend radius of the fiber in the circuit. At the initial position of an axis of the built-in BR $\pm \pi/4$ relative to the polarization vector of light on fiber end the SOP along fiber fluctuates symmetrically relative to the equator of the Poincare' sphere in latitude band $\pm \chi$:

$$\chi = \text{atan}(L_\tau/2L_\beta), \quad (4)$$

with the period of fluctuations T which is quite accurately satisfying the empirical formula:

$$T = \pi \sin^2 \chi (\cos \chi)^{-1/2}. \quad (5)$$

At other initial position of BR axis fluctuation gyrate curve is distorted and shifts from the equator to one of sphere poles.

To stabilize the operating point, the polarimetric current sensor on *spun* fiber is fundamentally constructed according to a two-pass scheme. One version of the scheme is described in detail in [4].

3.1 FOCS sensitivity with *spun* fiber. Modeling shows that average sensitivity of FOCS in this scheme is defined by:

$$\eta = \cos^2 \chi = \cos^2(\text{atan}(L_\tau/2L_\beta)), \quad (6)$$

with a range $\pm\Delta\eta$ of sensitivity variations at rotation of a sensitive circuit in space:

$$\Delta\eta = 2\eta L_\beta/L_R = 2\eta\beta_R/\beta. \quad (7)$$

Where β is the difference between the phases of the built-in BR, L_R is the length of beats of BR induced by fiber bends.

In figure 2 sensor sensitivity modeling results (vertical arrays of points) are presented for three radiuses of measuring circuit along with calculation results of ranges of possible fluctuations of sensitivity for formulas (6) and (7) (dotted curves on borders of

ranges) at value of parameter $\gamma = 2\pi/L\tau = 1000$ rad/m and a varied parameter β . Range of rotation of fiber circuit in space during modeling made – 0–90 deg with an increment of 9 deg, β increment – 50 rad/m.

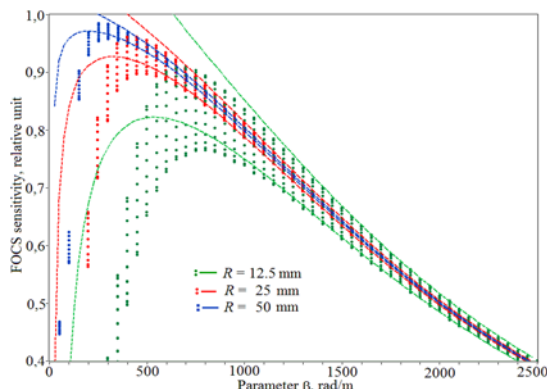


Figure 2 – FOCS sensitivity with *spun* fiber

When the condition of $\beta^2 > 20\gamma\beta R$ is met the results of modeling and calculation for formulas almost meet. Modeling results correlate with the results of experiments on a model sample of FOCS well [4].

Conclusions. Simple formulas for the description of sensitivity of the polarimetric fiber optic cur-

rent sensors are presented. Estimates of limit of their applicability are given.

References

1. Ulrich R., Simon A. Polarization optics of twisted single-mode fibers // Appl. Opt. – 1979. – Vol. 18. – № 13. – P. 2241–2251.
2. Nguyen T.X., Ely J.J., Szatkovski G.N. A fiber-optic current sensor for lighting measurement applications // Proc. SPIE 9480, Fiber optic Sensors and Applications XI (13 may 2015).
3. Lovchii I.L. Modelling the parameters of a polarimetric ac magneto-optical sensor with a sensitive loop made from a twist-type lightguide // J. Opt. Technol. – 2010. – Vol. 77. – № 6. – P. 376–386.
4. Lovchii I.L. Numerical modelling and investigation of a polarimetric current transducer with a spun-type lightguide // J. Opt. Technol. – 2010. – Vol. 77. – № 12. – P. 755–761.
5. Rashleigh S.C., Ulrich R. Magneto-optic current sensing with birefringent fibers // Appl. Phys. Lett. – 1979. – Vol. 34. – № 11. – P. 768–770.
6. Smith A.M. Birefringence induced by bends and twists in single-mode optical fiber // Appl. Opt. – 1980. – Vol. 19. – № 15. – P. 2606–2611.
7. Ulrich R., Rashleigh S.C., Eickhoff W. Bending-induced birefringence in single mode fibers // Opt. Lett. – 1980. – Vol. 5. – P. 273–275.

УДК 614.842

ГЕТЕРОГЕННОЕ ИНГИБИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ ЦЕНТРОВ ПЛАМЕНИ ЧАСТИЦАМИ ОГНЕТУШАЩЕГО ПОРОШКА В НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Кицак А.И.

Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем
чрезвычайных ситуаций МЧС Республики Беларусь
Минск, Республика Беларусь

Введение. Тушение пожара огнетушащим порошком обеспечивается двумя основными процессами: передачей тепла частицам порошка посредством их нагрева и химическим ингибированием продуктов горения либо поверхностью частиц порошка (гетерогенное ингибирование), либо веществами, образующимися при их испарении или разложении в результате поглощения тепла (гомогенное ингибирование).

Анализ схем тушения пожара порошками с применением струйных пневматических устройств доставки частиц порошка в зону горения показывает, что скорость частиц порошка, в газообразном горячем слое может достигать нескольких метров в секунду. [1]. При данных скоростях длительность t_{int} взаимодействия частиц порошка с активными центрами пламени в этой зоне составляет $\sim 10^{-4}$ – 10^{-5} с [1]. Примерно такого же порядка являются времена длительности реакции ингибирования активных центров пламени частицами порошка и их нагрева. В связи с этим можно предполо-

жить, что процесс тушения пожара огнетушащим порошком с применением установок пожаротушения со струйной подачей порошка во фронт пламени часто происходит в нестационарных условиях.

Целью настоящей работы являлось изучение особенностей гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка в нестационарных условиях взаимодействия.

Физическая модель тушения пожара. Рассмотрим схему тушения пожара струей огнетушащего порошка, подаваемой в зону горения по направлению к фронту пламени.

В некоторый момент времени в этой зоне, которая состоит из областей подогрева горячей среды, реакции горения и собственно пламени (светящейся зоны), сформируется дисперсный слой частиц порошка. Этот слой за промежуток времени $t_{вз} = l_{вз}/v$, зависящий от скорости частиц порошка v и эффективной толщины зоны реакции $l_{вз}$, покинет ее. Частицы слоя безвоз-

вратно покидают реакционную область, если горючим веществом является горючий газ (ГГ) или легковоспламеняющаяся жидкость (ЛВЖ). Когда осуществляется тушение твердого горючего материала (ТГМ), часть частиц порошка может осесть в обуглившимся зазорах материала, а часть, обладающая достаточной кинетической энергией, может отразиться от материала и снова попасть в реакционную область горения или покинуть ее.

За время пребывания частиц порошка в реакционной области они нагреваются до определенной температуры, в соответствии с их теплофизическим и дисперсным характеристикам, и адсорбируют на своей поверхности с некоторой вероятностью, зависящей от физико-химических характеристик материала и состояния их поверхности, активные центры пламени, состоящие из свободных атомов и радикалов горючего вещества.

Адсорбированные поверхностью частиц порошка активные центры пламени рекомбинируют с другими активными частицами пламени, достигших этой поверхности. В результате формируются неактивные частицы (молекулы) из родственных или неродственных атомов или радикалов продуктов горения. Процесс гетерогенного ингибирования приводит к обрыву цепей горения и в конечном результате к снижению тепловыделения.

Реакция гетерогенного ингибирования активных центров пламени осуществляется в каналах слоя, образованных частицами огнетушащего порошка.

Результаты и обсуждение. В предположении нестационарности процесса гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка получены зависимости скоростей dC/dt (C – концентрация активных частиц, адсорбированных поверхностью частиц слоя огнетушащего порошка) реакции ингибирования в кинетической и диффузионной областях ее протекания от дисперсных характеристик частиц порошка, их динамических параметров и кинетических параметров активных центров пламени.

В кинетической области скорость реакции в заданный момент времени t равна:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{3}{2\Phi d} \gamma u V_0 C_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\Delta\tau}\right) \right), \quad (1)$$

где γ – вероятность адсорбции активных частиц поверхностью частицы порошка; u – средняя тепловая скорость активной частицы, м/с; Φ – фактор формы частиц (для шарообразных частиц $\Phi = 1$); V_0 – объем, занимаемый частицами порошка в слое, м³; C_0 – концентрация активных частиц в объеме горючего газа, кг/м³;

d – диаметр эквивалентного шара, имеющего тот же объем, что и частица порошка, м; $\Delta\tau$ – эффективное время длительности реакции, равное:

$$\Delta\tau = \frac{1}{9} \frac{d^2}{NuD} \frac{\varepsilon^2 \Phi^2}{(1-\varepsilon)^2}, \quad (2)$$

где $\varepsilon = (V - V_0)/V$ – порозность слоя; V – общий объем, занимаемый слоем частиц порошка, м³; Nu – критерий Нуссельта для процесса диффузии; D – коэффициент диффузии, м²/с;

В диффузионной области:

$$\frac{dC}{dt} = 9 \frac{NuD}{d^2} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon \Phi^2} \times V_0 C_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\Delta\tau}\right) \right), \quad (3)$$

где $\Delta\tau$ равно:

$$\Delta\tau = \frac{1}{9} \frac{d^2}{D} \frac{\varepsilon^2 \Phi^2}{(1-\varepsilon)^2}. \quad (4)$$

Из выражений (1), (3) следует, что скорость реакции ингибирования определяется не только дисперсными характеристиками огнетушащего порошка и кинетическими параметрами активных центров, но и условиями тушения. Процесс обрыва цепей реакции горения частицами огнетушащего порошка происходит тем эффективнее, чем больше время взаимодействия $t_{вз} = l_{вз}/v$, где $l_{вз}$ – эффективная (зависящая от наклона оси струи порошка) длина взаимодействия частиц порошка с активными частицами в зоне реакции, м; v – скорость частиц в реакционной зоне, м/с) их с активными центрами пламени и, чем меньше эффективная длительность реакции ингибирования $\Delta\tau$.

Время взаимодействия $t_{вз}$ тем больше, чем больше эффективная длина взаимодействия $l_{вз}$ частиц порошка с активными центрами пламени и, чем меньше их скорость v в зоне реакции.

Эффективное время длительности реакции тем меньше, чем меньше размер частиц огнетушащего порошка и чем меньше их порозность.

Зависимость эффективности гетерогенного ингибирования активных центров пламени от эффективной длины взаимодействия их с частицами огнетушащего порошка подтверждается результатами экспериментальной работы [2], в которой наблюдалось более быстрое тушение пламени горючей жидкости огнетушащим порошком, когда струя порошка направлялась в зону горения под углом к нормали поверхности горения. Наклонная подача струи огнетушащего порошка в зону горения приводила к увеличению эффективной длины взаимодействия $l_{вз}$, а, следовательно, и к увеличению времени взаимодействия $t_{вз}$.

Полученные результаты дают также более естественное объяснение известного в пожаротушении парадокса, заключающегося в увеличении удельного расхода огнетушащего порошка при повышении интенсивности подачи порошка в зону горения. Этот эффект можно объяснить увеличением скорости частиц порошка при увеличении интенсивности подачи его в зону горения и, следовательно, уменьшением эффективности тушения пожара вследствие сокращения времени пребывания частиц порошка в зоне горения.

Уменьшение эффективности тушения пожара ведет к росту времени тушения и, соответ-

ственно, увеличению удельного расхода огнетушащего порошка.

Полученные результаты позволяют оптимизировать условия и режимы подачи огнетушащего порошка в зону горения с целью достижения максимального эффекта тушения пожара.

Литература

1. Абдурагимов И.М. О механизме огнетушащего действия средств пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность, 2012. – Т. 21, №4. – С. 60–82.
2. Баланюк В.М. Определение эффективности тушения огнетушащим аэрозолем горючей жидкости на открытом пространстве // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2015. – С. 4–10.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

<i>Иванец А.И., Прозорович В.Г.</i> ГЕТЕРОГЕННЫЕ ФЕНТОН КАТАЛИЗАТОРЫ НА ОСНОВЕ $MgFe_2O_4$, $MgLn_xFe_{(2-x)}O_4$, $MgFe_2O_4@g-C_3N_4$ ДЛЯ ДЕСТРУКЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛЛЮТАНТОВ	5
<i>Поздняков П.Г.</i> РАЗРАБОТКИ ОАО «ПЕЛЕНГ» В ОБЛАСТИ КОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ	7
<i>Баковец Н.В., Длугунович В.А., Жагора Н.А., Исаевич А.В., Никоненко С.В., Тарасова О.Б.</i> НАЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ В ОБЛАСТИ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКИ И ОПТИКИ	8
<i>Алексеев Ю.Г., Минченя В.Т., Королёв А.Ю., Нисс В.С.</i> НОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ЛЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО УЛЬТРАЗВУКА И ВАКУУМНОЙ ТЕРАПИИ	10

СЕКЦИЯ 1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ, ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА БЕЗОПАСНОСТИ

<i>Артемьев В.М., Наумов А.О.</i> ФИЛЬТРАЦИЯ СЛУЧАЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ СТАТИСТИЧЕСКОЙ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНЦИПОВ САМООРГАНИЗАЦИИ	15
<i>Барышникова С.Ю., Кочурова Д.Н., Калугин А.И., Заринов М.Р., Антонов Е.А.</i> МАКЕТ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ ОТРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ	17
<i>Борисовец А.Д., Дёмин В.С.</i> ПРИБОР ДЛЯ ПОДВОДНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ УФ-ОБЛУЧЕННОСТИ ВОДНЫХ СРЕД PIONDEEP	19
<i>Булатов О.В.</i> ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ СТАЛЬНОГО КОРПУСА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО ТОЛЩИНОМЕРА НА КРАЕВОЙ ЭФФЕКТ	21
<i>Бусько В.Н., Венгринович В.Л., Винтов Д.А., Ничитирук А.П., Сташков А.Н.</i> ПОРТАТИВНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА УСТАЛОСТЬ ОБРАЗЦОВ СТАЛИ 09Г2С, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	23
<i>Боровская О.О., Галузо В.Е., Коваль А.В.</i> ЛОКАЛИЗАЦИЯ АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ВИДЕОРЕГИСТРАТОРА	25
<i>Глинская Е.В.</i> ЗАЩИЩЁННОСТЬ ИНФРАСТРУКТУРЫ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ	26
<i>Гончаренко И.А., Ильюшонок А.В., Рябцев В.Н.</i> ДАТЧИК НАПРЯЖЕННОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ С НЕСКОЛЬКИМИ ЩЕЛЯМИ	28
<i>Гуркинов М.С., Левко И.А.</i> АРХИТЕКТУРА РАДИОМЕТРОВ-ДОЗИМЕТРОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ 32-БИТНЫХ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ	31
<i>Деленковский Н.В., Гнусин А.Б.</i> ВАКУУМНАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ КАПИЛЛЯРНОГО КОНТРОЛЯ	33
<i>Сопряков В.И., Кастевич А.Е.</i> МЕТОД МОДУЛЯЦИОННОГО ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В ДИАГНОСТИКЕ КАЧЕСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР	35
<i>Микитевич В.А., Жарин А.Л.</i> ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ФОТО-ЭДС	36
<i>Дудчик Ю.И.</i> ФОРМИРОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ И ГАММА-ПУЧКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИКАПИЛЛЯРНЫХ СТРУКТУР	38
<i>Дудчик Ю.И., Хилько Г.И., Кучинский П.В., Новик А.Н., Субач А.А.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБРАТНОРАСSEЯННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОСВЕЧИВАНИЯ ОБЪЕКТОВ	40
<i>Морозов Д.А., Кмита К.Ю., Пантелеев К.В.</i> МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ПОЛИМЕРОВ	42
<i>Есьман Г.А., Габеев В.Л., Ахмед Мохаммед Саяб Саяб, Mohamed Seiab Mahan</i> СТЕНД ИСПЫТАНИЯ ПЛИТКИ	44
<i>Есьман Г.А., Габеев В.Л., Муминбоев Азимджон</i> АВТОМАТ СОРТИРОВКИ ШТИФТОВ	46
<i>Зайцева Е.Г., Чернецкий М.В., Шевель Н.А.</i> ВНЕДРЕНИЕ ФУНКЦИЙ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ В КОНЦЕПЦИЮ «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ДОМ»	47
<i>Здоровцев С.В., Кушнеров Д.П., Сушко В.А.</i> БЕСПРОВОДНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ УДАЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ	49
<i>Зеленко В.В., Исаев А.В., Суходолов Ю.В.</i> АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ	51

<i>Иванов В.И., Иванов Н.И.</i> МАЛОГАБАРИТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙКИ ДИСКРЕТНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ	53
<i>Матвеевко В.Ю., Черняк А.С., Исаев А.В.</i> МОДЕРНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ КООРДИНАТНО-ШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА	55
<i>Шейников А.А., Исаев А.В., Зеленко В.В., Суходолов Ю.В.</i> ОЦЕНКА СКОРОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ	57
<i>Kandratsyeva N.K., Pronchack A.N., Isayev A.V.</i> AUTOMATIC NAIL TRANSFER TO THE IMM ZONE SYSTEM	59
<i>Исаев А.В., Зеленко В.В., Сизиков С.В.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРА НАМАГНИЧИВАЮЩЕГО ТОКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПРИ ДЕФЕКТАХ В ОБМОТКАХ	61
<i>Тявловский А.К., Жарин А.Л., Шаронов Г.В., Мухуров Н.И., Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Микитевич В.А.</i> СОПОСТАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ И АНАЛОГОВЫХ МЕТОДОВ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ	63
<i>Ковыньев Н.В.</i> ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ СТЕГАНОГРАФИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗОБРАЖЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ КОНТЕЙНЕРА	65
<i>Крень А.П., Ланцман Г.А., Делендик М.Н.</i> ОЦЕНКА ИНДЕКСА ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ	67
<i>Тявловский А.К., Поводайко А.Д., Пантелеев К.В., Жарин А.Л., Свистун А.И., Гусев О.К.</i> РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВОГО ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА БАЗЕ ОТЛАДОЧНОГО КОМПЛЕКТА ARDUINO	69
<i>Кутепов А.Ю., Крень А.П., Гнутенко Е.В.</i> ОЦЕНКА ПРЕЦИЗИОННОСТИ ПРИБОРА НТ-800 ДЛЯ КОНТРОЛЯ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ	71
<i>Лисенков Б.Н., Грицев Н.В.</i> МАТРИЧНЫЙ КОММУТАТОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВАХ И ВФХ	72
<i>Люцко К.С., Реутская О.Г., Плескачевский Ю.М., Песнякевич А.Г., Таратын И.А.</i> БИОСЕНСОРНОЕ УСТРОЙСТВО ЕМКОСТНОГО ТИПА С КОНЦЕНТРИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ	74
<i>Малютин Д.М.</i> ЭЛЕКТРОПРИВОД ПРИБОРНЫХ СИСТЕМ	76
<i>Жарин А.Л., Петлицкий А.Н., Пилипенко В.А., Тявловский А.К., Тявловский К.Л., Гусев О.К., Воробей Р.И., Пантелеев К.В.</i> ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ	78
<i>Малютин Д.М.</i> СИСТЕМА КОРРЕКЦИИ ГИРОСТАБИЛИЗАТОРА ГРАВИМЕТРА С ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИЕЙ СИГНАЛА ПЕРВОГО ИНТЕГРАТОРА	80
<i>Медведев Н.В.</i> ФОРМАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАЗРАБОТКИ ПОДСИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ЗАЩИЩЕННОСТИ ФАЙЛООБМЕННОГО СЕРВИСА	83
<i>Мелюшин П.В., Афанасенко А.В.</i> МОДИФИЦИРОВАННАЯ ОПТИМАЛЬНАЯ ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ «УМНОГО ГОРОДА»	85
<i>Мелюшин П.В., Афанасенко А.В.</i> ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ И СОЗДАНИЯ НОВОЙ ПРОДУКЦИИ В КОМПАНИИ APPLE	86
<i>Мисюкевич Н.С.</i> НЕОЧЕВИДНЫЕ РЕШЕНИЯ РАСЧЕТА ПОТОКОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭВАКУАЦИЕЙ ЛЮДЕЙ ПРИ ПОЖАРЕ	87
<i>Плытник Е.А., Савёлов И.Н.</i> СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В МЕГАПОЛИСЕ	89
<i>Тявловский А.К., Поводайко А.Д., Жарин А.Л., Воробей Р.И., Гусев О.К., Колтунович Т., Пантелеев К.В.</i> МЕТОДЫ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ	92
<i>Пономарев А.В.</i> ТЕОРИЯ ДВУМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ФИНИТНЫХ СИГНАЛОВ В ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ В БАЗИСАХ ФУРЬЕ С ВАРЬИРУЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ	94
<i>Пономарева О.В., Смирнова Н.В., Пономарев А.В.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОГИБАЮЩЕЙ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО ФИНИТНОГО ДИСКРЕТНОГО СИГНАЛА	96
<i>Попечиц В.И.</i> ГРАДУИРОВОЧНЫЕ ШКАЛЫ ДЛЯ ДЕТЕКТОРОВ ЖЕСТКИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ОСНОВЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РАСТВОРОВ, СОДЕРЖАЩИХ ПОЛИМЕТИНОВЫЕ КРАСИТЕЛИ	98
<i>Распопов В.Я.</i> ВОЛНОВОЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ГИРОСКОП ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ	100
<i>Воробей Р.И., Гусев О.К., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И., Свистун А.И.</i> ГАЗОРАЗРЯДНАЯ ЭПИТАКСИЯ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР	101
<i>Лихошерст В.В., Родионов В.И.</i> ИНЕРЦИОННЫЕ МОМЕНТЫ СИСТЕМ НАВЕДЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	103

<i>Савёлов П.И., Ливицц Ю.Е.</i> СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ	105
<i>Скурту И.Т., Ерошенко А.С., Брановицкий И.И.</i> ПРЕДСКАЗАНИЕ СОСТОЯНИЯ ЛИТИЕВОЙ ЯЧЕЙКИ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОЯЧЕЕЧНОЙ БАТАРЕЕЙ	107
<i>Смирнова Н.В., Пономарев А.В.</i> ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН МЕТОДОМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ	109
<i>Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И., Жуковский П.В., Тявловский А.К.</i> ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ С СОВМЕЩЕНИЕМ ПРОЦЕДУР КАЛИБРОВКИ	111
<i>Черняковский Д.Н., Односторонцев А.А., Михайлов А.О., Фёдорцев Р.В., Морозов П.М., Белов А.В.</i> ПИЛОТАЖНО-НАВИГАЦИОННЫЙ МОДУЛЬ СО ВСТРОЕННЫМ АЛГОРИТМОМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИЕЙ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПО СИГНАЛАМ ОТ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ	115
<i>Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И., Самарина А.В.</i> ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА БАЗЕ ФОТОПРИЕМНИКОВ С СОБСТВЕННОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ	118
<i>Завадская Т.Е.</i> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ИНФОРМАЦИИ В ОБЛАЧНЫХ СТРУКТУРАХ КОММЕРЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ	119
<i>Карташова Ж.К.</i> ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОМУ ДОСТУПУ В ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ANDROID	121
<i>Боженков В.В., Шахлевич Г.М.</i> ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПОДГОТОВКЕ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ	123
<i>Антошин А.А., Волков С.А.</i> КОНТРОЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ ПОЖАРЕ В ЖИЛОМ ПОМЕЩЕНИИ	125
<i>Бондарев В.В.</i> ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ	127
<i>Антошин А.А., Безлюдов А.А., Кучура Е.А., Галузо В.Е.</i> АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПОТОКА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ПРОШЕДШЕГО ЧЕРЕЗ ЗАДЫМЛЕННУЮ СРЕДУ ПРИ ПИРОЛИЗЕ И ТЛЕНИИ ХЛОПКА В ПОМЕЩЕНИИ	128
<i>Глухманчук В.В., Сычик В.А., Уласюк Н.Н.</i> ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ МДП-ТРИОДНОЙ СТРУКТУРЫ	130
<u>Джиславдари И.З.</u> , <i>Ризноокая Н.Н., Касьмин В.Ю., Матвиевич В.Г.</i> МЕТОДИКА И УСТРОЙСТВО БАЛАНСИРОВКИ МАЯТНИКА С ОПОРОЙ НА ОДИН ШАРИК	132
<i>Смолина Е.В.</i> УСТРОЙСТВА РАЗВЯЗКИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГО УРОВНЯ ПОМЕХ СО СТОРОНЫ МОЩНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ	133

СЕКЦИЯ 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

<i>Анисович А.Г., Акула И.П., Жуковский П.В., Маркевич М.И., Щербакова Е.Н., Чекан Н.М.</i> МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ, МАГНИТОРЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА ЛАВСАНА, С УГЛЕРОДНЫМ ПОКРЫТИЕМ МОДИФИЦИРОВАННОГО КЛАСТЕРАМИ МЕТАЛЛОВ	136
<i>Бринкевич Д.И., Бумай Ю.А., Киевицкая А.И., Кийко А.Н.</i> АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНТРОЛЯ ДОЛГОЖИВУЩИХ β -ИЗЛУЧАЮЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАДИОФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ НА ОСНОВЕ ^{18}F	138
<i>Гуляева С.И., Литвинович Г.С., Силюк О.О., Цикман И.М.</i> СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ СПЕКТРАЛЬНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ХВОЙНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО ДАННЫМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА	140
<i>Дубовик Н.А., Левко И.А.</i> ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОКОМПЕНСАЦИИ КОМПАКТНОГО ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ ТОРЦЕВОГО СЧЕТЧИКА ГЕЙГЕРА	142
<i>Железнов А.Ю., Андросенко Р.М.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ ИСПЫТАНИЙ И РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОВЕРКИ СТЕНДОВ ТОРМОЗНЫХ	144
<i>Длугунович В.А., Дунец Д.О., Исаевич А.В., Круплевич Е.А., Насенник Л.Н.</i> НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЭТАЛОН ЕДИНИЦ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ	145
<i>Соломахо В.Л., Цитович Б.В., Михейчик А.В.</i> МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОПЕРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ПРЕДЕЛЬНЫМИ КАЛИБРАМИ	147
<i>Нефедов С.Н.</i> МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ: АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ	149

Обозный Е.А. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ НАЦИОНАЛЬНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦ ТВЕРДОСТИ	151
Почужевский О.Д., Кристоичук М.Е., Радкевич М.В. ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ОЦЕНКИ ДОРОЖНЫХ УСЛОВИЙ И СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ	153
Лукаш В.С., Соломахо В.Л., Лукаш С.М. МАЛОГАБАРИТНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ-СИГНАЛИЗАТОР ДЛЯ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ	155
Saukova Y.N., Malashonak S.V. UNCERTAINTY ESTIMATING OF THE COMPLEX VALUES IN ELECTROMAGNETIC MEASUREMENTS	157
Попов А.В., Серенков П.С. АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ПИЩЕВОЙ ОТРАСЛИ	159
Скачек В.Н., Астафьева Л.Е. МОДУЛЬНЫЙ ПОДХОД ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО АУДИТА	161
Соломахо В.Л., Багдюн А.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ МЕТОДОВ СОЗДАНИЯ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ	163
Томашук А.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА БЕСФИЛЬЕРНОГО ВОЛОЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ	165
Цапенко В.В., Терещенко Н.Ф. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТОПЫ	167
Бринкевич Д.И., Просолович В.С., Черный В.В. ОБЛУЧЕННЫЕ ГАММА-КВАНТАМИ ПЛЕНКИ ПОЗИТИВНОГО РЕЗИСТА ФП9120 НА ПЛАСТИНАХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ	169
Беляев Ю.В., Чумаков А.В., Попков А.П. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЫХАЮЩИХ ЕЛЬНИКОВ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ АППАРАТУРЫ «МУЛЬТИСКАН»	171
Шарандо В.И., Чернышёв А.В., Кременькова Н.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ 12Х18Н10Т	173
Ширяева В.Д., Щербакова Е.Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНОК НАНОКОМПОЗИТОВ И ПОЛИОКСИБУТИРАТА МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ	175
Ширяева В.Д., Щербакова Е.Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНОК ПОЛИОКСИБУТИРАТА МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ	177
Анисович А.Г., Маркевич М.И., Журавлева В.И., Щербакова Е.Н., Шаповалов С.В. ИССЛЕДОВАНИЯ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ НАТУРАЛЬНОЙ КОЖИ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ	179
Спесивцева Ю.Б., Клевещ О.С., Кошица Д.С. САМООЦЕНКА В ОДО «АКВАЭКОЛОГИЯ»	181
Спесивцева Ю.Б., Надеждин О.А. ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ЛУКОМЛЬСКОЙ ГРЭС	183
Воронова Т.С., Рудницкий Ф.И., Романчук В.М., Рудая А.Н. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС МЕТОДОВ ЭКСПЕРТНОГО ОЦЕНИВАНИЯ КАК МЕТОДИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПРОДУКЦИИ	185
Белевич Д.Б., Гуревич В.Л. АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ	187
Гуревич В.Л., Белова Е.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ТОНКИХ И СВЕРХТОНКИХ ПЛЕНОК	189
Евсюк Е.А., Вольнец А.С., Гуревич В.Л., Серенков П.С. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ СОВМЕСТИМОСТЬ С ПОМОЩЬЮ БЕЗЭХОВЫХ ЭКРАНИРОВАННЫХ КАМЕР	190
Красильников Е.В., Гуревич В.Л., Бардонов А.И., Серенков П.С. ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ РАЗРАБОТКИ ГОСУДАРСТВЕННОГО СТАНДАРТА, РЕГЛАМЕНТИРУЮЩЕГО ПОВЕРКУ КАЛИБРАТОРОВ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ	192
Станкевич М.А., Гуревич В.Л. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ МАГАЗИНОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ	194
Коробко Ю.С. АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ДИОДНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ	196
Михейчик А.В., Ленкевич О.А. РЕАЛИЗАЦИЯ ПИЛОТНОГО ПРОЕКТА ПО ПОВЫШЕНИЮ УДОВЛЕТВОРЕННОСТИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НА БАЗЕ РУП «НАЦИОНАЛЬНЫЙ АЭРОПОРТ “МИНСК”»	198
Лысенко В.Г., Цитович Б.В. ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СРЕДСТВ ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ФОРМЫ ЗАНЯТИЙ	200

<i>Серенков П.С., Белов П.С.</i> ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЙКИ И СУШКИ БЫТОВЫХ ПОСУДОМОЕЧНЫХ МАШИН ПРИ ИСПЫТАНИИ ИХ ПО ПАРАМЕТРАМ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ	202
<i>Серенков П.С., Воронова Т.С., Романчук В.М.</i> ФРАКТАЛЬНО-ПОКООРДИНАТНЫЙ МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ПОИСКА РАЦИОНАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ПРОДУКЦИИ	203
<i>Серенков П.С., Герасимчик Е.Е.</i> ФОРМИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА НА ОСНОВЕ КЛАСИФИКАЦИИ ВИДОВ ЭНДОПРОТЕЗОВ ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА И ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К НИМ	205
<i>Фомиченко Е.А., Серенков П.С.</i> ОБОСНОВАНИЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОГРАММЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА	207
<i>Серенков П.С., Чурак Н.В.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЕТЕНТНОСТИ И ОСВЕДОМЛЕННОСТИ ПЕРСОНАЛА В ВОПРОСАХ СИСТЕМНОГО МЕНЕДЖМЕНТА	209
<i>Серенков П.С., Чурак Н.В.</i> АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА ПО ВОПРОСАМ СИСТЕМНОГО МЕНЕДЖМЕНТА КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБУЧЕНИЯ ВОЗДУХА	211
<i>Соколовский С.С.</i> МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ МАСЛЯНЫХ НАСОСОВ РОТОРНОГО ТИПА С РЕГУЛИРУЕМОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ	213
<i>Соколовский С.С., Алексиевич А.М.</i> МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА БЕСКОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ	214
<i>Самохвал П.М., Бельский И.В.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМ ЗАХВАТА ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАРУШЕНИЙ ОСАНКИ У СТУДЕНТОВ БЕЛОРУССКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА	215
<i>Цитович Б.В., Соломахо В.Л.</i> МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ, НЕ ПРЕОБРАЗУЮЩИХ СИГНАЛ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ	217
<i>Баев А.Р., Митковец А.И., Майоров А.Л., Бурнос А.В., Гиль Н.Н.</i> О ВОЗБУЖДЕНИИ ВОЛН ЛЭМБА БЕСКОНТАКТНЫМИ СПОСОБАМИ	219
<i>Будай А.Г., Гринчук А.П., Громыко А.В.</i> РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ КОМПАКТНОГО ПОЛИГОНА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫХ СИСТЕМ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ	221
<i>Гуревич В.Л., Серенков П.С., Волынец А.С., Толочко Т.К., Ермакович А.В.</i> МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ЕДИНИЦЫ ОСЛАБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ	223
<i>Латицкая В.А., Кузнецова Т.А., Хабарова А.В., Трухан Р.Э., Чижик С.А., Торская Е.В.</i> СТРУКТУРА И УДЕЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТНАЯ ЭНЕРГИЯ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПЛЕНОК	225
<i>Кулагин В.Н., Осипов А.А., Пиунов В.Д.</i> МОДИФИКАЦИЯ МЕРЫ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ФЕРРОЗОНДОВЫХ ГРАДИЕНТОМЕТРОВ С НЕСООСНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ПОЛУЗОНДОВ	227
<i>Савкова Е.Н., Шевчук В.А., Сипачев И.В.</i> КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ РЕЕСТРА РИСКОВ АККРЕДИТОВАННОЙ ЛАБОРАТОРИИ В КОНТЕКСТЕ ТРЕБОВАНИЙ СТАНДАРТА ГОСТ ISO/IEC 17025-2019	229
<i>Savkov N.</i> STUDENT-TO-WORKER TRANSITION AS A FACTOR OF CHINESE LABOR IMMIGRATION TO EUROPEAN COUNTRIES	231
<i>Сычик В.А., Уласюк Н.Н., Глухманчук В.В.</i> МЕТОДИКА БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ ПОСТОЯННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЦЕПЯХ	233

СЕКЦИЯ 3. ФИЗИЧЕСКИЕ, ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ, МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

<i>Блинкова Н.Г., Князев М.А.</i> РЕШЕНИЕ ТИПА КИНКА МОДИФИЦИРОВАННОГО УРАВНЕНИЯ ФИШЕРА-КОЛОМОГОВОРА-ПЕТРОВСКОГО-ПISКУНОВА	235
<i>Киселев М.Г., Богдан П.С., Соболев Д.В.</i> УСТРОЙСТВО И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ТАБЛЕТОК НА СЖАТИЕ	236
<i>Киселев М.Г., Богдан П.С.</i> УСТРОЙСТВО И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТИРАЕМОСТИ ТАБЛЕТОК	238
<i>Бокуть Л.В., Деев Н.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО МЕТОДА ПОДАВЛЕНИЯ ПОМЕХ В РАДИОКАНАЛАХ ОХРАННО-ПОЖАРНЫХ СИСТЕМ СИГНАЛИЗАЦИИ	240

<i>Борздов А.В., Борздов В.М., Кучинский П.В., Петлицкий А.Н.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАТНОЙ ВЕТВИ ВОЛЬТАМЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЕВОГО ДИОДА МНОГОЧАСТИЧНЫМ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО	242
<i>Бумай Ю.А., Васьков О.С., Нисс В.С.</i> КОРРЕКЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ РАСТЕКАНИЯ ТЕПЛА В МОЩНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ	244
<i>Гайдук Ю.С., Голодок Р.П., Моховиков М.А., Савицкий А.А., Паньков В.В.</i> ФЛУОРИСЦЕНТНЫЕ ПИГМЕНТЫ ДЛЯ ПЕЧАТНЫХ КРАСОК НА ОСНОВЕ ОКСИСУЛЬФИДОВ РЗЭ	246
<i>Гусакова О.В., Шепелевич В.Г.</i> МИКРОСТРУКТУРА СПЛАВА Sn-Zn-Bi-Ga, ПОЛУЧЕННОГО ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ЗАТВЕРДЕВАНИЕМ	248
<i>Жевняк О.Г., Жевняк Я.О.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПОДВИЖНОСТИ В ЭЛЕМЕНТАХ ФЛЕШ-ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ КОРОТКОКАНАЛЬНЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ	250
<i>Гайдук Ю.С., Моховиков М.А., Шевцова К.А., Коробко Е.В., Усенко А.Е., Паньков В.В.</i> ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ НАПОЛНИТЕЛИ ДЛЯ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ МАГНЕТИТА И ЗАМЕЩЕННЫХ ФЕРРИТОВ	252
<i>Зерница Д.А., Шепелевич В.Г.</i> СТАБИЛЬНОСТЬ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Sn-Zn ПРИ ОТЖИГЕ	254
<i>Князев М.А.</i> ЗАДАЧА О ДИССИПАТИВНОМ УРАВНЕНИИ ДВИЖЕНИЯ ТЕОРИИ ϕ^4 С НАРУШЕНИЕМ ЛОРЕНЦ-ИНВАРИАНТНОСТИ	256
<i>Зезюля П.А., Гацкевич Е.И., Малевич В.Л., Симицын Г.В.</i> ТЕРАГЕРЦОВЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ВОЛНОВОД С ВНЕШНИМ СЛОЕМ ГРАФЕНА	258
<i>Прусова И.В., Прихач Н.К., Сергеев И.И.</i> ЗАВИСИМОСТЬ НЕКОТОРЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВИРОВАННЫХ СТЕКОЛ ОТ ЭФФЕКТИВНОЙ СИЛЫ ИЗ ХИМИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ	260
<i>Романчак В.М., Гундина М.А.</i> СТАНДАРТНЫЙ И СИНГУЛЯРНЫЙ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ	262
<i>Кондратьева Н.А., Гундина М.А., Юхновская О.В.</i> АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СОСТАВЛЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ	264
<i>Реутская О.Г., Денисюк С.В., Куданович О.Н., Мухуров Н.И., Лугин В.Г., Таратын И.А.</i> ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СЛОЕВ In_2O_3 ДЛЯ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ	266
<i>Скицюк В.И., Клочко Т.Р.</i> МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЕТАЛИ ТИПА «ВАЛ»	268
<i>Slavinskas S., Pauliukas A., Bubulis A., Vėžys J.</i> EXPERIMENTAL STUDIES OF DIESEL FUEL PREPARED FROM OIL PRODUCT WASTE	270
<i>Ксенофонтов М.А., Васильева В.С., Выдумчик С.В., Гавриленко О.О., Горохов С.Л., Павлюкевич Т.Г., Понарядов В.В.</i> МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ПО ПОДГОТОВКЕ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАЛИВКЕ НАПОЛНЕННЫХ И НЕНАПОЛНЕННЫХ МУЛЬТИКОМПОНЕНТНЫХ ГИБРИДНО-КОМПОЗИТНЫХ СМЕСЕЙ	272
<i>Кузнецова Т.А., Лапицкая В.А., Петровская А.С., Мельникова Г.Б., Хабарова А.В., Чижик С.А., Зыкова А.В., Сафонов В.И.</i> СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ ОДНОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ОКСИДОВ ТАНТАЛА И АЛЮМИНИЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ	274
<i>Мадвейко С.И., Тихон О.И., Тодин П.А., Бордусов С.В., Достанко А.П.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН НА СВЧ РАЗРЯД В ПЛАЗМОТРОНЕ РЕЗОНАТОРНОГО ТИПА	275
<i>Лапицкая В.А., Кузнецова Т.А., Хабарова А.В., Трухан Р.Э., Чижик С.А., Куприн А.С., Кудин Д.В., Конеру А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ НИКЕЛЕВОГО ПОКРЫТИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ФОСФОРОМ	277
<i>Ланин В.Л., Достанко А.П.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В КРИСТАЛЛАХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ ПРИ МОНТАЖЕ НА ПОДЛОЖКУ	279
<i>Николаева Т.А., Таратын И.А., Плескачевский Ю.М.</i> ПОЛИВИНИЛИДЕНФТОРИД КАК МАТЕРИАЛ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕМБРАН	281
<i>Николаева Т.А., Таратын И.А., Плескачевский Ю.М.</i> МЭМС-ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ	283
<i>Орлов Е.Е., Малый С.В.</i> ТЕХНОЛОГИЯ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ НАИХУДУШЕГО СЛУЧАЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ	284
<i>Петухов И.Б., Китарин И.Н.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ГЕНЕРАТОРА МИКРОСВАРКИ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 60-140 кГц	286
<i>Пилько В.В. (ст.), Пилько В.В.</i> КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ТРИБОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ	288

<i>Полеицук Н.Н., Рудницкий А.С.</i> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОННЫХ НАНОСТРУЙ В ДИФРАКЦИОННЫХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЯХ ИЗОЛИРОВАННЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ	290
<i>Реутская О.Г., Таратын И.А.</i> ФОТОПРОВОДИМОСТЬ НИЗКОЭНЕРГОПОТРЕБЛЯЮЩИХ СЕНСОРОВ С ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ СЛОЯМИ $\text{In}_2\text{O}_3 - \text{SnO}_2$	292
<i>Рысик А.Н., Плескачевский Ю.М.</i> ПЕРСПЕКТИВЫ НЕИНВАЗИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ГЛЮКОЗЫ	294
<i>Савич В.В.</i> МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ И В МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКЕ	296
<i>Савченко А.Л., Минченя В.Т., Стамбровский А.С., Королев А.Ю., Адзериho И.Э.</i> КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ГИБКИХ ВОЛНОВОДОВ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТРОМБОЛИЗИСА	299
<i>Савченко А.Л., Минченя В.Т., Нисс В.С., Луцик П.Е.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ИЗ НИТИНОЛА	301
<i>Савченко А.Л., Минченя Н.Т., Скурковина Л.Е.</i> ВЕСЫ ДЛЯ ПОКОЛЕСНОГО ВЗВЕШИВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ	303
<i>Попов Р.Ю., Дятлова Е.М., Самсонова А.С., Шамколович В.И.</i> КОРДИЕРИТСОДЕРЖАЩАЯ КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ МАГНИЙСОДЕРЖАЩИХ КОМПОНЕНТОВ	305
<i>Попов Р.Ю., Дятлова Е.М., Самсонова А.С., Шамкалович В.И.</i> ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ВОЛЛАСТОНИТА	307
<i>Сандомирский С.Г.</i> АНАЛИЗ УСЛОВИЙ СНИЖЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ДВУХПАРАМЕТРОВОГО МАГНИТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ СТАЛЕЙ	309
<i>Свирина Л.П.</i> ОДНОМОДОВЫЙ ГАЗОВЫЙ ЛАЗЕР С ПРОИЗВОЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНОЙ И ТИПОМ АНИЗОТРОПИИ РЕЗОНАТОРА	311
<i>Соловьёв Я.А., Пилипенко В.А., Яковлев В.П., Хлопков Н.С., Гринцевич Е.В., Сарычев О.Э.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН ПРИ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ НА УСТАНОВКЕ «УБТО 1801»	313
<i>Телеш Е.В., Данилевич Д.С.</i> ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОК SiO_2 ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ИОННЫХ ПУЧКОВ	315
<i>Телеш Е.В., Романович Я.Г.</i> СИНТЕЗ ПЛЕНОК НИТРИДА УГЛЕРОДА ПРЯМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ИОННЫХ ПУЧКОВ	317
<i>Федькин В.А., Таратын И.А., Плескачевский Ю.М.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОРСИОННЫХ ПОДВЕСОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МЭМС-ДАТЧИКА УГЛА НАКЛОНА	319
<i>Хабарова А.В., Кузнецова Т.А., Лапицкая В.А., Куприн А.С., Чижик С.А., Трухан Р.Э.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НИТРИДА ВАНАДИЯ	321
<i>Оджаев В.Б., Петлицкий А.Н., Просолович В.С., Филипеня В.А., Шестовский Д.В., Черный В.В., Явид В.Ю., Янковский Ю.Н.</i> АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ БИПОЛЯРНОГО $n-p-n$ ТРАНЗИСТОРА	323
<i>Горбачук Н.И., Ластовский С.Б., Оджаев В.Б., Петлицкий А.Н., Просолович В.С., Ковальчук Н.С., Филипеня В.А., Черный В.В., Шестовский Д.В., Янковский Ю.Н.</i> ВЛИЯНИЕ γ -ОБЛУЧЕНИЯ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ $p-i-n$ -ФОТОДИОДОВ	325
<i>Мельникова Г.Б., Соломянский А.Е., Толстая Т.Н., Чижик С.А., Корольков И.В., Здоровец М.В.</i> СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ГИДРОФИЛИЗИРОВАННЫХ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТНЫХ ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН	327
<i>Шабура М.А., Колонтаева Т.В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ В СИСТЕМЕ RO-VaO-TiO_2	329
<i>Шабура М.А., Колонтаева Т.В.</i> СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ВИСМУТСОДЕРЖАЩЕЙ СЕГНЕТОКЕРАМИКИ	330
<i>Шепелевич В.Г., Гусакова С.В., Гусакова О.В.</i> ФАЗОВЫЙ СОСТАВ, ТЕКСТУРА И МИКРОТВЕРДОСТЬ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ СПЛАВА $\text{Bi}_{20}\text{In}_{28}\text{Sn}_{52}$	332
<i>Ясюкевич А.С., Кулешов Н.В., Рачковская Г.Е., Захаревич Г.Б., Трусова Е.Е.</i> ВХОЖДЕНИЕ ИОНОВ ТУЛИЯ В КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ И СТЕКЛЯННУЮ ФАЗЫ В ОКСИФТОРИДНОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКЕ	334
<i>Бобученко Д.С.</i> РАСЧЕТ ФАКТОРОВ ЭФФЕКТИВНОСТЕЙ ОСЛАБЛЕНИЯ, РАССЕЯНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ СИСТЕМОЙ ВОДЯННЫХ КАПЕЛЬ	336
<i>Дятлова Е.М., Попов Р.Ю., Богдан Е.О., Колонтаева Т.В.</i> ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ БЕЗОБЖИГОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО И УТИЛИЗИРУЕМОГО ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЯ	338
<i>Бурак В.А., Караткевич З.М.</i> ІМПУЛЬСНИ МАГНІТНИ КАНТРОЛЬ ЯКАСЦІ ВОДПУСКУ ВИРАБАЇ 3 ХУТКАРЭЗНАЙ СТАЛІ Р9 ПА СТАНДАРТНЫХ МАГНІТНЫХ ПАРАМЕТРАХ	340

Счастный А.С., Осипов А.А. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ УПРОЧНЕННЫХ СЛОЁВ ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ ПРИ НАЛИЧИИ ТРЕЩИН	341
Дятлова Е.М., Сергеевич О.А., Колонтаева Т.В., Бука А.В. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЖИГА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ТИТАНСОДЕРЖАЩЕЙ КЕРАМИКИ	343
Шумило В.С., Сычик В.А., Уласюк Н.Н. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ХОЛОДИЛЬНЫХ АППАРАТОВ	346

СЕКЦИЯ 4. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

Альхимович М.А., Кузнечик В.О. ИЗМЕРЕНИЕ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ ОБЪЕКТИВА	349
Богданович Д.А., Мандик Н.С., Федорцев Р.В. ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОПТИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ЛАЗЕРНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ	351
Бручковский И.И., Литвинович Г.С., Попков А.П., Цикман И.М., Домарацкий А.В. АВТОНОМНЫЙ МНОГОКАНАЛЬНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ СЕНСОР ДЛЯ БПЛА	354
Бручковский И.И., Литвинович Г.С., Силюк О.О., Домарацкий А.В. МУЛЬТИКАНАЛЬНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ СЕНСОР МКСС-1	355
Воропай Е.С., Ермалицкая К.Ф., Ермалицкий Ф.А., Луценко Е.В., Радько А.Е., Ржеуцкий Н.В., Самцов М.П. ПИКОСЕКУНДНЫЕ ДИОДНЫЕ ЛАЗЕРЫ ДЛЯ ФЛУОРОМЕТРИИ	357
Вяжевич Г.И., Фёдорцев Р.В., Соснина Л.А. КОЛЛИМИРУЮЩАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО МОДУЛЯ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 405 НМ	359
Дернович О.П., Гусакова Н.В., Кисель В.Э., Павлюк А.А., Кулешов Н.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРИСТАЛЛА NO:KYW ПРИ РЕЗОНАНСНОЙ НАКАЧКЕ В ОБЛАСТИ 1.96 МКМ	362
Гусаров И.Е., Алексеев Н.И., Калугин А.И., Антонов Е.А., Зарипов М.Р. МАКЕТ ЛАЗЕРНОГО ЛОКАТОРА МАЛОГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТРИЧНОГО ФОТОПРИЁМНИКА	363
Дернович О.П., Гусакова Н.В., Ясюкевич А.С., Кисель В.Э., Кравцов А.В., Колесова И.М., Гурецкий С.А., Кулешов Н.В. ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В ВОЛНОВОДНОМ РЕЖИМЕ НА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ СЛОЕ ДВОЙНОГО КАЛИЕВОГО ВОЛЬФРАМАТА С ИОНАМИ ГОЛЬМИЯ	365
Ефимова У.А., Шаранова Г.М., Антонов Е.А., Калугин А.И., Зарипов М.Р. МАКЕТ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВИДЕНИЯ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ СИСТЕМ	367
Зарипов М.Р., Алексеев В.А. ВОЗМОЖНОСТЬ ПОСТРОЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА НА ЗЕРКАЛЬНО-ПРИЗМЕННОЙ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ	366
Киль И.А., Шилин А.А., Погорелов М.Г. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МАТРИЧНЫХ МОДУЛЕЙ КОРОТКОВОЛНОВОГО ИК-ДИАПАЗОНА ИНОСТРАННОГО ПРОИЗВОДСТВА	371
Коваленко М.Н., Минько А.А., Понарядов В.В. ТЕПЛОВИЗОР БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА	373
Козерук А.С., Диас Гонсалес Р.О., Кузнечик В.О., Богданович Д.А. ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОБРАБОТКИ КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ	375
Козерук А.С., Диас Гонсалес Р.О., Кузнечик В.О., Семчёнок А.В. СПОСОБ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С КОНИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ	377
Козерук А.С., Кулешов Д.Ю., Черепок Е.А., Шляхтун С.В., Шамкалович В.И. КОНЦЕПЦИЯ МОДУЛЬНЫХ СВЕТОДИОДНЫХ ПАНЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ИХ ПОДСВЕТКИ	379
Козерук А.С., Диас Гонсалес Р.О., Кузнечик В.О., Семчёнок А.В. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ КОНИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ	381
Козерук А.С., Диас Гонсалес Р.О., Кузнечик В.О., Мандик Н.С. ЭТАПЫ ОБРАБОТКИ КОНИЧЕСКИХ ЛИНЗ	383
Кузнецов А.В., Фёдорцев Р.В. ПРИБОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЧНОСТИ СКЛЕЙКИ ЛИНЗ	384
Ланин В.Л., Фам В.Т., Петухов И.Б. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОПЕРЕДАЧИ ПРИ ПРОШИВКЕ КРЕМНИЕВОЙ ПОДЛОЖКИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ	387
Литвинович Г.С., Бручковский И.И. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ КОМПОНЕНТ ШУМА ПЗС-ДЕТЕКТОРА	389
Залесский В.Б., Малютина-Бронская В.В., Сорока С.А., Ермаков О.В., Гребенищikov О.А., Леонова Т.Р. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ БАЗОВЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВИДОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ	391
Сорока С.А., Залесский В.Б., Малютина-Бронская В.В., Лемешевская А.М., Солодуха В.В. КРЕМНИЕВЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ С ВНУТРЕННИМ УСИЛЕНИЕМ ШИРОКОГО СПЕКТРА ПРИМЕНЕНИЯ	393
Мельникова Г.Б., Латицкая В.А., Петровская А.С., Акулова В.М., Толстая Т.Н., Кузнецова Т.А., Котов Д.А., Чижик С.А. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ТОНКИХ ПЛЕНОК ПОЛИ(9-ВИНИЛКАРБАЗОЛА)	395

<i>Невдах В.В.</i> О ДОПЛЕРОВСКОМ КОНТУРЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ	397
<i>Нестерёнок А.В., Залесский В.Б., Сенькевич Д.В.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ В УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ	400
<i>Палабугин М.В., Усольцев В.П.</i> ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА СКАНИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ	402
<i>Романов Д.В., Фёдорцев Р.В.</i> СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АЛГОРИТМОВ СЖАТИЯ ДИКМ, JPEG И JPEG 2000 ПРИ ОБРАБОТКЕ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ	403
<i>Руденков А.С., Кисель В.Э., Ясюкевич А.С., Ованесьян К.Л., Петросян А.Г., Кулешов Н.В.</i> РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ЧИРПИРОВАННЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА КРИСТАЛЛЕ УЬ:УАР	405
<i>Руденков А.С., Кисель В.Э., Ясюкевич А.С., Ованесьян К.Л., Петросян А.Г., Рубцова Н.Н., Ковалев А.А., Преображенский В.В., Кондратюк Н.В., Гоман Д.А., Кулешов Н.В.</i> ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ПИКОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРОМ НА КРИСТАЛЛЕ УВ:ЛУАР	407
<i>Артюхина Н.К., Самусенко А.А., Черных И.В.</i> ИЗМЕРЕНИЕ РАДИУСОВ ЛИНЗ ДЛЯ КРУПНОГАБАРИТНОЙ ОПТИКИ АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫМ МЕТОДОМ	409
<i>Силук О.О., Литвинович Г.С., Ломако А.А., Станчик В.В., Гуляева С.И., Бручковский И.И.</i> ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ И СОДЕРЖАНИЯ ПИГМЕНТОВ В ОБРАЗЦАХ РАСТЕНИЙ	411
<i>Соснина Л.А., Фёдорцев Р.В., Вяжевич Г.И., Рупека С.С.</i> ЮСТИРОВКА ВИЗИРНОГО КАНАЛА МАЛОГАБАРИТНОГО ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА	413
<i>Сычик В.А., Глухманчук В.В., Уласюк Н.Н.</i> ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИК-ИЗЛУЧЕНИЙ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР	415
<i>Воропай Е.С., Тарасов Д.С., Гулис И.М., Самцов М.П., Радько А.Е., Ермалюцкая К.Ф., Зажогин А.П., Шевченко К.А., Кирсанов А.А.</i> АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ АТОМНО-ЭМИССИОННЫЙ МНОГОКАНАЛЬНЫЙ СПЕКТРОМЕТР	417
<i>Алексеев В.А., Усольцева А.В., Усольцев В.П.</i> ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ	418
<i>Филонова М.И., Козерук А.С., Р.О. Диас Гонсалес</i> СПОСОБ, ПОВЫШАЮЩИЙ ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ЕГО КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ	420
<i>Фильчук А.С., Фёдорцев Р.В.</i> СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ МИКРОЛИНЗ	422
<i>Шор Р.В., Ясюкевич А.С.</i> АНАЛИЗ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ВОЛОС МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-ИСКРОВОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ	424
<i>Голубев Ю.В., Щербаков Н.Г., Ломако А.А., Хомищевич А.Д., Беляев М.Ю., Сармин Э.Э.</i> МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ВАРИАНТ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ ВИДЕОСПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ «СОВА-2-426»	425
<i>Ватутина В.Е., Кисель В.Э., Орехов К.А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА Nd:YAG	427
<i>Глазунов И.В., Маляревич А.М., Юмашев К.В., Дымищ О.С.</i> ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА СИТАЛЛОВ ЦИНК-ГАЛЛИЙ-АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СОСТАВА	429
<i>Горбаченя К.Н., Кисель В.Э., Лопухин К.В., Балашов В.В., Федин А.В., Герке М.Н., Кулешов Н.В.</i> СИНТЕЗ И СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ Er:Y ₂ O ₃ И Er:YAG	431
<i>Гацкевич Е.И., Ивлев Г.Д., Гундина М.А.</i> ДИФФУЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГЕРМАНИЙ-КРЕМНИЕВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ	433
<i>Гундина М.А., Кондратьева Н.А., Грузд Н.А.</i> ПРОФИЛЬ ЯРКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ВДОЛЬ ЛИНИИ	435
<i>Манего С.А., Груздев Ю.А.</i> ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СОСТАВА НА ЛЮМИСЦЕНЦИЮ ГЕТЕРОСТРУКТУР InAs _x P _{1-x} /InP (0,1 < x < 0,7)	437
<i>Балохонов Д.В., Сернов С.П., Коничева Л.М.</i> ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФАР ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ДЕТАЛЯМИ ВТОРИЧНОЙ ОПТИКИ	438
<i>Рыжевич А.А., Балыкин И.В., Хило Н.А., Мащенко А.Г., Железякова Т.А.</i> ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОНИЧЕСКОГО СВЕТОВОГО ПУЧКА	440
<i>Митьковец А.И., Рыжевич А.А., Мащенко А.Г., Балыкин И.В., Варанецкий А.М.</i> СТЕНД ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ ТИТАНИЛ ФОСФАТА КАЛИЯ (КТР)	442
<i>Lovchy I.L.</i> SENSITIVITY VARIATIONS OF POLARIMETRIC CURRENT SENSORS ON TWIST AND SPUN FIBERS	446
<i>Кицак А.И.</i> ГЕТЕРОГЕННОЕ ИНГИБИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ ЦЕНТРОВ ПЛАМЕНИ ЧАСТИЦАМИ ОГНЕТУШАЩЕГО ПОРОШКА В НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	448

Научное издание

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ-2020

Материалы
13-й Международной научно-технической конференции

18–20 ноября 2020 года
Минск, Республика Беларусь

Ответственный за выпуск *Н.Н. Ризноокая*
Оформление и компьютерная вёрстка *О.Л. Чабаровой, К. В. Пантилеев*

Подписано в печать 13.11.2020. Формат 60×84 ¹/₈. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 53,24. Уч.-изд. л. 20,82. Тираж 150. Заказ 719.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.