

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

BELARUSIAN NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY

JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» HOLDING MANAGING COMPANY

BELARUSIAN STATE INSTITUTE OF METROLOGY

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

INSTRUMENTATION ENGINEERING – 2024

**Proceedings
of the 17th International Scientific and Technical Conference**

November 26–29, 2024
Minsk, Republic of Belarus

**Minsk
2024**

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

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – УПРАВЛЯЮЩАЯ КОМПАНИЯ ХОЛДИНГА «ИНТЕГРАЛ»
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН БЕЛАРУСИ**

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ – 2024

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

26–29 ноября 2024 года
Минск, Республика Беларусь

**Минск
2024**

УДК 681.2(063)

ББК 34.9я431

П 75

Редакционная коллегия:

канд. техн. наук, доцент А. И. Свистун (председатель);
д-р техн. наук, профессор О. К. Гусев, канд. техн. наук, доцент Р. И. Воробей;
д-р техн. наук, доцент Н. А. Жагора; д-р физ.-мат. наук, доцент М. А. Князев;
чл.-корр. НАН Беларуси, д-р физ.-мат. наук, профессор А. М. Малярович;
чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор Ю. М. Плескачевский;
канд. техн. наук, доцент А. Л. Савченко; 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 В. Е. Матюшков;
чл.-корр. НАН Беларуси, д-р физ.-мат. наук, профессор С. А. Тихомиров

Издание включает материалы 17-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение–2024» 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.

ISBN 978-985-6845-75-1

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

UDC 539.51; 621.396.2

EXPLORING THE PROPERTIES AND APPLICATIONS OF METAMATERIAL STRUCTURES

Dipak Patil¹, Suyog Pande², Akhilesh Kuma¹¹Sandip Institute of Engineering and Management
Nashik, Maharashtra, India²SVKM's NMIMS MPSTME Shripur Campur
Mumbai, Maharashtra, India

Abstract. A structure inspired by double-negative metamaterials is reviewed in this study. By employing the Nicolson-Ross-Weir (NRW) method, we determine the permittivity and permeability of the review metamaterial unit cell. In the literature survey we had analyzed and characterized metamaterial and revealing a negative real permittivity (ϵ_r). The findings suggest that the existing structure demonstrates double-negative properties for different resonating frequencies.

Key words: NRW method, metamaterial, permittivity, permeability.

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАМАТЕРИАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Дипак Патил¹, Суйог Панде², Ахилеш Кума¹¹Институт инженерии и менеджмента Сандип
Нашик, Махараштра, Индия²Школа управления технологиями и инженерии им. Мукеша Пателя (Институт управленческих исследований Нарси Монджи) при образовательной организации Шри Виле Парле Келафани
Мумбаи, Махараштра, Индия

Аннотация. В этом исследовании рассматривается структура, основанная на двойных отрицательных метаматериалах. Используя метод Николсона-Росса-Вейра (NRW), определена диэлектрическая проницаемость и проницаемость элементарной ячейки рассматриваемого метаматериала. Теоретически проанализирован метаматериал и выявлена отрицательная активная диэлектрическая проницаемость (ϵ_r). Полученные результаты позволяют предположить, что существующая структура демонстрирует двойные отрицательные свойства для разных резонансных частот.

Ключевые слова: метод NRW, метаматериал, диэлектрическая проницаемость, проницаемость.

Address for correspondence: Sandip Institute of Engineering and Management (SIEM), Nashik, Maharashtra, India, e-mail: dipak.patil@siem.org.in

Introduction. Today's advanced communication systems offer a variety of features such as multiband performance, higher data rate transmission, various diversities but also need to be compact and simple in use [1]. By performing multiple functions within a single system, the system's complexity can be reduced. A promising solution to improve system performance is the use of reconfigurable antennas, which can

provide diversity at various levels [2]. Reconfigurable MTM offers the necessary features for smart antennas. We have been motivated to conduct comprehensive research in the field of reconfigurable MTM antennas due to various challenges reported in the literature such as complex structures [3–5], limited tunability [3], lower gain [5], lower bandwidth, large size [6] and use of complex biasing circuitry.

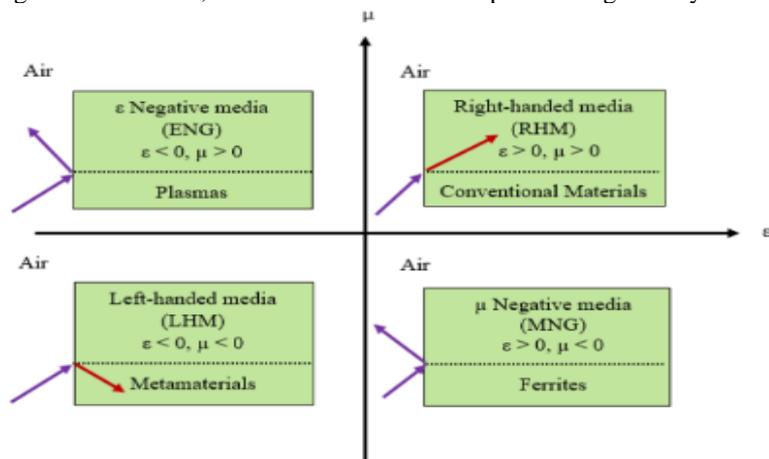


Figure 1 – Classification of Materials

A material's response to electromagnetic radiation is characterized by its electric permittivity (ϵ) and magnetic permeability (μ). Recent studies [7] suggest that by tuning these properties to negative values, a negative refractive index can be achieved. Materials exhibiting both negative permittivity ($\epsilon < 0$) and permeability ($\mu < 0$) are classified as double-negative [8]. To form a double negative metamaterial, both permittivity (ϵ) and permeability (μ) need to be negative, achieved by merging specific materials with these properties.

We studied existing metamaterial-inspired structure [10] with double-negative characteristics for use in wireless applications. The permeability and permittivity of the structure were calculated through the NRW method. Figure 2 illustrates the classifications of material and also properties of metamaterials structures.

Study and analysis of Metamaterials structures:

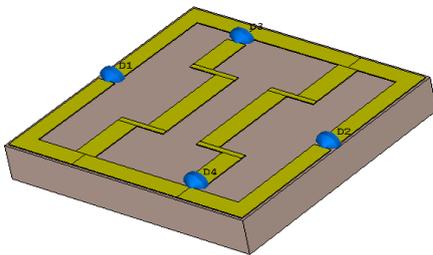


Fig 2 – Prospective View [10]

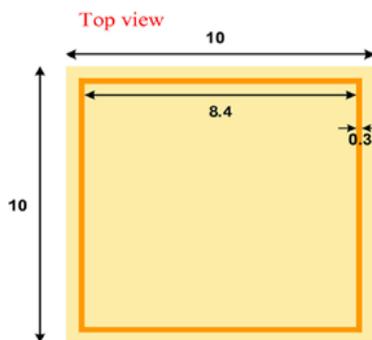


Fig 3 – Top View [10]

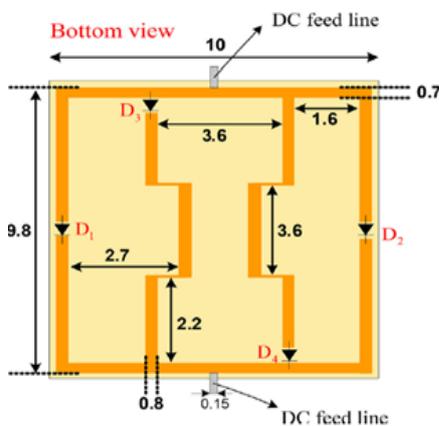


Fig 4 – Bottom View [10]

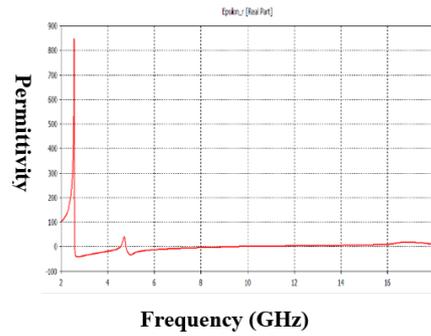


Fig 5 – Epsilon Curve

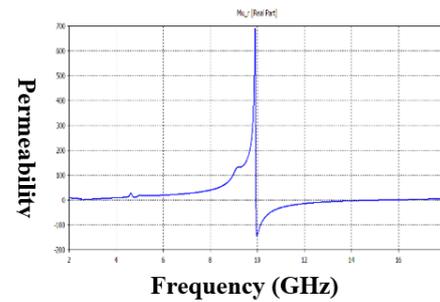


Figure 6 – Mu Curve

Figure 2 illustrated the the 3D Perspective view of the metamaterial base antenna [10]. While the Figs. 3 and 4 shows the top and bottom views of the antenna design by authors in [10] suggested antenna. Furthermore, the Figure 5 illustrated the frequency vs. permittivity curves. As we can observed from Figure 4 the permittivity curves achieved the negative values, which justify the characteristics of metamaterials properties. However, Figure 6 shows the permeability vs frequency plot. Which is also provides the justification of metamaterials properties.

Conclusion. This literature survey proposes a metamaterial-inspired structure with double-negative properties for potential wireless applications. The permeability and permittivity were measured using the NRW method. Simulation results, carried out across a frequency range of 2 to 10 GHz and analyzed in HFSS, reveal negative real values for permittivity and permeability.

References

1. Compact ness and performance enhancement techniques of ultra-wideband tapered slot antenna: A comprehensive review / S. Saleh [et al.] // Alexandria Engineering Journal. – 2023. – V. 74, № 1. – P. 195–229.
2. Reconfigurable Antennas: Switching Techniques – A Survey / O. P. Naser [et al.] // Electronics. – V. 9, № 2. – P. 1–14.
3. Minakshmi Shaw. Analysis of frequency reconfigurable microstrip patch antenna with unidirectional radiation pattern for IRNSS band / Minakshmi Shaw, Yogesh Kumar Choukiker // AEU – International Journal of Electronics and Communications. – 2021. – V. 141, Article ID 153962. – P. 1–11.
4. Nguyen-Trong, N. A Frequency-Reconfigurable Dual-Band Low Profile Monopolar Antenna / N. Nguyen-Trong, A. Piotrowski, and C. Fumeaux // IEEE Transactions on Antennas Propagation. – V. 65, №. 7. – P. 3336–3343.

5. Singh, D. Miniaturization and Gain Enhancement of Microstrip Patch Antenna Using Defected Ground with EBG / D. Singh, A. Thakur, and V. M. Srivastava // Journal of Communications. – 2018. – V. 13, – № 12. – P. 730–736.
6. Sharjeel Riaz. A Miniaturized Frequency Reconfigurable Patch Antenna for IoT Applications / Sharjeel Riaz, Khan M., Javed U., Zhao X. // Wireless Personal Communications. – 2022. – V. 123. – P. 1871–1881.
7. Filtenna with Frequency Reconfigurable Operation for Cognitive Radio and Wireless Applications / M. A. Abdelghany [et al.] // Micromachines (Basel). – 2023. – V. 14, № 1. – P. 1–13.
8. V. V. Fisanov // Russ. Phys. J. – 2018. – V. 61, № 6. – P. 1129. – DOI: 10.1007/s11182-018-1506-3.
9. C. Miliadis, R. B. Andersen, P. I. Lazaridis, Z. D. Zaharis, B. Muhammad, J. T. B. Kristensen, A. Mihovska, and D. D. D. Hermansen // IEEE Access, X, 1. – 2021. 9. – DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3091479.
10. Maryam Majidzadeh. Novel single layer reconfigurable frequency selective surface with UWB and multi-band modes of operation / Maryam Majidzadeh, Changiz Ghobadi, Javad Nourinia / International Journal of Electronics and Communications (AEU). – 2016 – V. 70, № 2. – P. 151–161.

UDC 378

RESEARCH AND EDUCATION OPPORTUNITIES IN PARTNERSHIP BETWEEN HARARE INSTITUTE OF TECHNOLOGY AND BNTU

Musiiwa P.¹, Tyavlovsky A.², Zizhou C.¹

¹Harare Institute of Technology, Harare, Republic of Zimbabwe

²Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The current state of education and research and development (R&D) work in Harare Institute of Technology (HIT) is briefly reviewed, as well as opportunities in partnership between HIT and Belarussian National Technical University (BNTU). The proposed roadmap of cooperation between HIT and BNTU includes correspondence training of HIT teachers in the postgraduate program of the Belarussian National Technical University in English, organization of short advanced training courses in English for HIT teachers at BNTU, lecturing by BNTU teachers at HIT during short visits, implementation of joint R&D between the Innovation Hub of the Harare Institute of Technology and the BNTU Science and Technology Park "Polytechnic" and others.

Key words: education; research and development; scientific cooperation; postgraduate studies; educational programs.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОТРУДНИЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ХАРАРЕ И БНТУ В ОБЛАСТИ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

Муслива П. Б.¹, Тявловский А. К.², Зижу Ч.¹

¹Технологический институт Хараре, Хараре, Республика Зимбабве

²Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Кратко рассматривается текущее состояние образовательной и научно-исследовательской (НИОКР) работы в Технологическом институте Хараре (НИТ), а также возможности партнерства НИТ и Белорусского национального технического университета (БНТУ). Предлагаемые направления сотрудничества НИТ и БНТУ включают заочную подготовку преподавателей НИТ в аспирантуре Белорусского национального технического университета на английском языке, организацию краткосрочных курсов повышения квалификации на английском языке для преподавателей НИТ в БНТУ, чтение лекций преподавателями БНТУ в НИТ во время краткосрочных визитов, реализацию совместных НИОКР между Инновационным хабом НИТ и Научно-технологическим парком БНТУ «Политехник» и др.

Ключевые слова: образование, научные и опытно-конструкторские работы, научное сотрудничество, аспирантура, образовательные программы.

Адрес для переписки: Тявловский А. К., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

In April 2024, a representative of BNTU Andrey K. Tyavlovsky completed an internship at the Harare Institute of Technology (HIT), Republic of Zimbabwe. During the internship, a wide range of issues on possible cooperation between HIT and BNTU were discussed.

The main profiles of students training at HIT, provided by the relevant departments, are: biomedical technologies; chemical production technology (including food production technology); electronics, including programmable digital devices based on microcontrollers, industrial automation systems, power electronic devices; information technology; mechanics; metalworking technologies. Training is carried out at the first (bachelor's) and second (master's)

levels of higher education on a fee-paying basis. The term of study in the bachelor's degree is 4 years, in the master's degree is 2 years. The schedule of the educational process in Zimbabwe is somewhat different from the schedule of the educational process in the Republic of Belarus: e.g., the academic year in Zimbabwe begins on August 5.

The Harare Institute of Technology has a sufficiently high scientific and technical level to develop cooperation with technical universities in Belarus, particularly with BNTU. It is also noticed that HIT has an urgent need to train highly qualified scientific personnel due to the lack of a system for training and certification of scientific personnel in Zimbabwe,

while the scientific and pedagogical level of the local teaching staff is sufficient for successful completion of postgraduate studies at BNTU in English. During the internship a round table was held with teachers of Biomedical Engineering and Electronics Engineering Departments who wish to improve their scientific qualifications in the postgraduate (PhD) program of BNTU. The round table discussed the issues of choosing a topic and a scientific supervisor, the structure of the dissertation research, confirmation of scientific and practical significance, testing the results of the dissertation research through publications in peer-reviewed scientific journals and presentations at international scientific and technical conferences, implementation of the results in production, the procedure for opposing and defending dissertations and other issues. Following the discussion, those present at the round table expressed great interest in completing postgraduate studies and defending dissertations in the Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus, while during the conversation it became clear that a number of the teachers present already have a necessary scientific background and a completed or almost completed research, but experience difficulties with the publication of their scientific results due to the lack of peer-reviewed scientific journals on the relevant topic in the Republic of Zimbabwe and neighboring countries. So publications in Belarussian scientific journals and presentation of research papers on scientific and technical conferences in the Republic of Belarus could be a good way for Zimbabwean researchers to approve their results and a possible point of cooperation for HIT and BNTU.

Scientific research and development (R&D) at the Harare Institute of Technology is conducted on applied topics within a separate structure – the Innovation Hub (Figure 1), which is a close analogue of the Scientific and Technological Park of BNTU "Polytechnic" in terms of its organizational principles and the tasks it solves. The Innovation Hub provides a laboratory base and equipment for scientific research, including such conducted as integral part of the educational process. If the R&D work turns into start-up, the Innovation Hub provides advertising and information support, and, in case of a start-up's success, provides further support in registering spin-off company. Part of the research work is provided by budget funding from the Ministry of Education and Science of the Republic of Zimbabwe while the main funds come from the implementation of business contracts with enterprises and organizations in Zimbabwe.

The main areas of scientific research in the Innovation Hub are related to solutions to issues of import substitution of various electrical and electronic equipment, in particular, power transformers, industrial automation systems based on programmable logic controllers, mobile payment terminals, validators for public transport; development and production of injection molds for plastics under direct business contracts, as well as production of plastic parts

themselves using high-pressure molding; development of new chemical production technologies; development of mobile water purification and disinfection systems; production of household chemicals as part of a startup; production of bottled water and soft drinks on behalf of the spin-off company Instifoods, etc.



Figure 1 – The Innovation Hub



Figure 2 – Inside the workshop

The Innovation Hub has a significant machine park located in two workshops on the campus. One of them contains CNC machines, machining centers, a casting machine, etc., used in contract work and scientific research (Figure 2). The other workshop contains manually controlled machines. These machines are used mainly for training students as part of industrial practice, which helps students better understand the principles of operation of the equipment, its modes, and metalworking technologies. Thus, the Innovation Hub also acts as a base for industrial practice, which at the Harare Institute of Technology is carried out on the institute's own premises without sending students to third-party organizations.

The Harare Institute of Technology demonstrated a high interest in cooperation with BNTU in the educational and scientific spheres. As specific proposals for cooperation in a course of mentioned internship, the representatives of the Institute named the implementation of joint educational programs at the first stage of higher education according to the "2 + 2" scheme, training of students of the Harare Institute of Technology at the BNTU Summer School in English, full-time education of master's students at the second stage of higher education at BNTU in English, correspondence training of teachers of the Harare Institute of Technology in the postgraduate program of the Belarussian National Technical University in English, organization of short advanced training courses in

English for teachers of the Harare Institute of Technology at BNTU, lecturing by BNTU teachers at the Harare Institute of Technology during short visits, implementation of joint R&D between the Innovation Hub of the Harare Institute of Technology and the BNTU Science and Technology Park "Polytechnic". The main interest from the Zimbabwean side is

caused by the specialties of biomedical directions, which corresponds to the profile of the Department of Design and Production of Devices of the Instrument Engineering Faculty of BNTU. On these issues, it seems appropriate to conclude Cooperation Agreements between the relevant divisions of BNTU and the Harare Institute of Technology.

UDC 621

SCALABLE 3D PERCEPTION: FROM ENVIRONMENTAL RECONSTRUCTION TO WORKPIECE MEASUREMENT

Zhou Xuefeng

*Institute of Intelligent Manufacturing, Guangdong Academy of Sciences
Guangzhou, China*

Annotation. Three-dimensional geometric perception serves as a primary means for understanding the environment and objects, essential for both industrial and everyday applications. Advances in sensor technology and algorithms have expanded the scope of 3D perception, enabling its use across various fields such as geological surveying, robotic navigation, and industrial manufacturing. However, the practical application of raw point clouds, which consist of discrete 3D points, faces challenges related to robustness and accuracy, especially when derived from diverse sensors with differing characteristics. This paper introduces the "Point Cloud +" approach, incorporating multi-modal sensor fusion, deep feature extraction, active viewpoint planning, and motion priors. The approach enhances raw point clouds with additional features and priors, supporting robust and precise perception for both large-scale environmental reconstruction and workpiece measurement. Key contributions include a geometric-semantic joint mapping framework for outdoor environments, a degeneration-aware place recognition method, and a planning-control-reconstruction system for accurate workpiece measurement.

Keywords: 3D perception, point clouds, multi-modal sensor fusion, environmental reconstruction, workpiece measurement, deep feature extraction, viewpoint planning, accuracy

МАСШТАБИРУЕМОЕ 3D-ВОСПРИЯТИЕ: ОТ РЕКОНСТРУКЦИИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ДО ИЗМЕРЕНИЯ ЗАГОТОВОК

Чжоу Сюэфэн

*Институт интеллектуального производства Гуандунской академии наук
Гуанчжоу, Китай*

Аннотация. Трёхмерное геометрическое восприятие является основным способом понимания окружающей среды и объектов, что играет ключевую роль как в промышленности, так и в повседневной жизни. Прогресс в области сенсорных технологий и алгоритмов обработки расширил возможности 3D-восприятия, позволив его применение в таких сферах, как геологические исследования, навигация роботов и промышленное производство. Тем не менее, использование необработанных облаков точек, представляющих собой дискретные трёхмерные точки, сталкивается с проблемами устойчивости и точности, особенно при использовании различных сенсоров с разными характеристиками. В данной работе представлен подход «Point Cloud +», включающий многомодальную сенсорную интеграцию, глубокое извлечение признаков, планирование точек обзора и учёт движения. Этот подход добавляет к исходным облакам точек дополнительные признаки и приоритеты, улучшая их устойчивость и точность в задачах как крупномасштабной реконструкции окружающей среды, так и точного измерения заготовок. Основные элементы включают геометрически-семантическую карту для неструктурированных открытых пространств, метод распознавания местности с учётом деградации данных, а также систему управления и реконструкции для точного измерения объектов.

Ключевые слова: 3D-восприятие, облака точек, многомодальная сенсорная интеграция, реконструкция окружающей среды, измерение заготовок, извлечение признаков, планирование точек обзора, точность.

Three-dimensional geometric perception is humanity's most common and fundamental means of understanding the surrounding environment and objects, playing a crucial role in both production and daily life. Recent advancements in sensor hardware and processing algorithms have significantly accelerated the development and application of 3D perception techniques. From geological surveys to robotic navigation and industrial manufacturing, point clouds are widely used to represent environments or products across

varying scales. However, challenges remain in the real-world application of raw point clouds at all scales.

Raw point clouds are, by nature, discrete sets of homogeneous 3D points with positional coordinates as their primary attributes. Only through the arrangement and proximity of these points can geometric insights into objects, environments, or surfaces be discerned. Furthermore, point clouds captured from different hardware (e.g., 2D LiDAR, 3D LiDAR, laser scanners) exhibit variations in perceptual range, field of view

(FOV), and resolution, leading to issues of reduced robustness, inaccurate registration, and incomplete reconstruction across different scales and tasks. In this presentation, the “Point Cloud +” approach is introduced, focusing on multi-modal sensor fusion, deep feature extraction and description, active viewpoint planning, and high-precision motion priors. Under the “Point Cloud +” framework, a geometric-semantic joint mapping framework is proposed for large-scale, unstructured outdoor environments; a degenera-

tion-aware, rapid place recognition method is presented; and a planning-control-reconstruction system is developed to address issues of inaccurate and incomplete reconstruction in precise workpiece measurement. The “Point Cloud +” approach effectively incorporates additional features, attributes, and priors into raw point clouds, aiming to improve the robustness and accuracy of point cloud perception across applications ranging from large-scale environmental reconstruction to precise workpiece measurement.

УДК 621.396.6/92 001.92:37

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШКОЛЫ РАЗРАБОТЧИКОВ
ЭЛЕКТРО-И РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ В УСЛОВИЯХ САНКЦИОННОЙ
ПОЛИТИКИ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ ОТРАСЛИ**

Рачицкий А. М., Таболич Т. Г.

ОАО «МНИПИ»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Радиоизмерительное приборостроение представляет собой одну из ключевых областей в сфере радиоэлектронной техники. В условиях стремительного технологического прогресса и глобализации экономики, оно сталкивается с множеством вызовов, которые требуют комплексного анализа и поиска эффективных решений, в том числе формирование школы разработчиков электро-и радиоизмерительных средств в условиях санкционной политики на современном этапе развития отрасли.

Ключевые слова: радиоизмерительное приборостроение, развитие школы, эффективные решения, формирование навыков у выпускников учебных заведений, кооперация с университетом.

**IMPROVING THE EFFECTIVENESS OF THE SCHOOL OF DEVELOPERS OF ELECTRICAL
AND RADIO MEASURING INSTRUMENTS IN THE CONTEXT OF SANCTIONS POLICY
AT THE CURRENT STAGE OF INDUSTRY DEVELOPMENT**

Rachitsky A., Tabolich T.

OJSC MNIPI

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Radio measuring instrumentation is one of the key areas in the field of electronic engineering. In the context of rapid technological progress and the globalization of the economy, it faces many challenges that require a comprehensive analysis and search for effective solutions, including the formation of a school of developers of electrical and radio measuring instruments in the context of sanctions policy at the current stage of industry development.

Key words: radio measuring instrumentation, challenges, effective solutions, the formation of skills among graduates of educational institutions, cooperation with the university.

*Адрес для переписки: Рачицкий А. М., ул. Я. Коласа 73, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: mnipi@mnipi.by*

Импортозамещение, как ключевой вызов, требует не только разработки новых технологий и компонентов, но и переосмысления существующих производственных и образовательных процессов, что в свою очередь влияет на качество и конкурентоспособность отечественной радиоэлектронной аппаратуры. В условиях, когда многие радиоэлектронные компоненты ранее импортировались, задача их замещения становится особенно актуальной и требует комплексного подхода.

Научные исследования и разработки играют ключевую роль в создании новых технологий и компонентов, что, в свою очередь, способствует развитию всей отрасли. Важно отметить, что взаимодействие между научными, образовательными учреждениями и промышленностью может

значительно ускорить процесс внедрения инноваций и повысить уровень конкурентоспособности отечественной продукции.

На протяжении последних трех десятилетий основную долю поставленных предприятиям Республики Беларусь и Российской Федерации электроизмерительных и радиоизмерительных средств измерений составляла продукция производства компаний США, Европейского Союза, Японии, КНР, Тайваня.

Текущая ситуация в сфере обеспечения российских и белорусских предприятий электроизмерительными и радиоизмерительными приборами характеризуется существенным повышением стоимости и сроками поставки, приобретаемой в обход санкций аппаратуры зарубежного производства.

Связано это объявлением о полном запрете поставок своей продукции в Российскую Федерацию и Республику Беларусь американских, европейских и японских производителей измерительной аппаратуры, прекращением послегарантийного и гарантийного обслуживания поставленного оборудования, а также остановкой ранее организованного производства аппаратуры на мощностях российских предприятий.

Организация разработки и производства соответствующей импортозамещающей продукции силами российских и белорусских компаний в краткосрочной перспективе затруднительна за счет дефицита квалифицированных разработчиков электроизмерительных и радиоизмерительных средств измерений на территории бывшего Советского Союза.

Эффективные государственные программы и проекты, направленные на создание необходимых для науки и промышленности электроизмерительных и радиоизмерительных средств измерений в рамках импортозамещения в Республике Беларусь, практически отсутствуют. Государственные научные программы и государственные программы научных исследований имеют такие условия коммерциализации, которые выполнить в ряде случаев не представляется возможным.

Таким образом, в ближайшие годы предприятия оборонного сектора экономики и радиоэлектронной промышленности Российской Федерации и Республики Беларусь с большой долей вероятности столкнутся с проблемой дефицита электроизмерительной и радиоизмерительной аппаратуры.

Складывающиеся обстоятельства в свою очередь приводят к существенным затруднениям в развитии прикладных и естественных наук, появлению узких мест в производственных процессах и существенному снижению качественных и технических параметров производимой продукции. И, как следствие минимального вливания денежных средств в образовательные процессы и формирование высокоэффективной собственной школы разработчиков электроизмерительных и радиоизмерительных средств измерений.

Такая ситуация на рынке электроизмерительных и радиоизмерительных средств измерений приводит к замещению аппаратуры собственного производства, электроизмерительной и радиоизмерительной средствами измерений китайского производства.

В данных условиях недостаток квалифицированных специалистов и вопросы качества новых разработок и импортозамещения становятся первоочередными.

В настоящий момент ОАО «МНИПИ» является практически единственной компанией на постсоветском пространстве, сохранившей компетенцию в создании и производстве линейки электроизмерительных и радиоизмерительных

приборов: измерителей иммитанса, прецизионных мер и калибраторов электрических величин, электронно-счетных частотомеров, измерительных генераторов сигналов, цифровых вольтметров, амперметров и мегаометров, аналоговых и цифровых осциллографов, измерительных антенн и опорно-поворотных устройств к ним. Производимая ОАО «МНИПИ» продукция внесена в государственные реестры Республики Беларусь и Российской Федерации.

Решению вопросов удержания и развития собственной школы разработчиков уделяется много внимания. Основным путем решения данного вопроса является развитие кооперации с ведущими учебными образовательными учреждениями Республики Беларусь.

Так в 2018 году на базе ОАО «МНИПИ» основан филиал кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

С целью повышения эффективности работы научно-технического комплекса ОАО «МНИПИ», и развития школы разработчиков электроизмерительных и радиоизмерительных средств измерений в области приборостроения принято решение продолжить работу и в 2024 году приказом ректора Белорусского национального технического университета на базе ОАО «МНИПИ» создан филиал кафедры информационно-измерительной техники и технологий. В целях обеспечения функционирования кафедры на базе ОАО «МНИПИ» подготовлена лаборатория на семь учебных мест, оснащенная современным измерительным оборудованием. Студенты смогут приобрести навыки работы с универсальными вольтметрами, электронными осциллографами, генераторами сигналов, электронно-счетными частотомерами, анализаторами спектра, измерителями иммитанса, а также приобрести практические знания в области разработки и проектирования электроизмерительных и радиоизмерительных средств измерений.

Все представленное оборудование является оборудованием собственного производства, востребованным на сегодня в Республике Беларусь и Российской Федерации.

Практика получения навыков под руководством опытных разработчиков является неотъемлемой частью образовательного процесса в лаборатории, так как именно в процессе работы формируются необходимые компетенции для успешного выполнения технических задач приборостроения.

Дополнительным существенным преимуществом ОАО «МНИПИ» является наличие собственной аккредитованной в системе аккредитации поверочных лабораторий Республики Беларусь центральной измерительной лаборатории (ЦИЛ). Область ее аккредитации включает в себя поверку 23 номенклатур средств измерений.

В условиях глобализации и растущей конкуренции, акцент на высокие стандарты качества становится особенно актуальным, что подчеркивает необходимость подготовки квалифицированных специалистов, способных эффективно работать и в этой области.

В краткосрочной перспективе в целях формирования квалифицированной смены текущего поколения разработчиков планируется задействовать и ресурс ЦИЛ. Кроме практическим навыков,

особое внимание будет уделено теоретическим аспектам работы разработчика в области приборостроения.

Таким образом, работа в кооперации с ведущими образовательными учреждениями, такими как БНТУ и БГУИР будет направлена на формирование целостного представления о навыках работы в области производства, электроизмерительных и радиоизмерительных средств измерений и формирования необходимых компетенций специалистов.

Секция 1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ, ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА БЕЗОПАСНОСТИ

UDC 621.396.2

A FOAM-BASED PARTIAL GROUND WEARABLE MICROSTRIP PATCH ANTENNA FOR 5G WIRELESS APPLICATIONS

Suhas Raosaheb Kale¹, Dipak Pandurang Patil², Akhilesh Kumar²

¹E&TC Department, Sandip Institute of Technology and Research Centre

²Sandip Institute of Engineering and Management
Nashik, India

Abstract. The antenna is designed using foam substrate with dimension of 33.30×35.96×1.6 mm³ operates from 3.3 to 5.2 GHz, covering 5G sub-6 GHz NR bands N77 (3.3–4.2 GHz), N78 (3.3–3.8 GHz), and N79 (4.4–5 GHz) with a bandwidth (BW) of 1900 MHz and S11 of –40.59 dB at 4.45 GHz. SAR analysis, using a three-layer body phantom, measures electromagnetic energy absorption by human tissues over 1 g and 10 g, meeting international SAR standards (1.6 W/kg for 1 g, 2 W/kg for 10 g). Results show the antenna maintains efficient radiation across the 5G spectrum while adhering to safety limits.

Key words: 5G Wireless Communications, Foam, Wearable Antenna, Specific Absorption Rate.

ПЕНОПОЛНЕННАЯ НОСИМАЯ МИКРОПОЛОСКОВАЯ АНТЕННА С ЧАСТИЧНЫМ ЗАЗЕМЛЕНИЕМ ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ 5G ПРИЛОЖЕНИЙ
Суhas Раосахeб Кале¹, Дипак Пандуранг Патиль², Ахилеш Кума²

¹Институт технологий и исследовательский Центр Сандип

²Институт инженерии и менеджмента Сандип
Нашик, Индия

Аннотация. Антенна разработана на пеноматериале с размерами 33,30×35,96×1,6 мм³ и работает в диапазоне от 3,3 до 5,2 ГГц, охватывая суб-6 ГГц NR-диапазоны 5G: N77 (3,3–4,2 ГГц), N78 (3,3–3,8 ГГц) и N79 (4,4–5 ГГц) с полосой пропускания (BW) 1900 МГц и коэффициентом отражения S11 на уровне –40,59 дБ при 4,45 ГГц. Анализ SAR, выполненный с использованием трехслойного фантома тела, измеряет поглощение электромагнитной энергии тканями человека на 1 г и 10 г, что соответствует международным стандартам SAR (1,6 Вт/кг для 1 г и 2 Вт/кг для 10 г). Результаты показывают, что антенна сохраняет эффективное излучение в спектре 5G, соответствуя нормативам безопасности.

Ключевые слова: беспроводная связь 5G, пеноматериал, носимая антенна, удельный коэффициент поглощения (SAR).

Address for correspondence: Kale S. R, Research Scholar, Deapartment of E&TC, SITRC Nashik, India
e-mail: kalesuhas123@gmail.com

Introduction. Wearable technology is highly popular, driving demand for wearable antennas in items like jackets, watches, and GPS shoes. These antennas support health monitoring, navigation, RFID, military, and safety applications. 5G technology enhances these devices with high speed, low latency, and stability [1].

Arpan Desai et al. [2] presented a transparent, flexible patch antenna on a polyethylene terephthalate substrate with Silver Tin Oxide (AgHT-8), measuring 0.48λ × 0.64λ at 4.28 GHz. It provides 40 % bandwidth (3.89 to 5.9 GHz), over 3 dBi gain, and 80 % efficiency, suitable for sub-6 GHz 5G and WLAN. Zhen Yu et al. [3] designed a flexible, dual-band rectangular patch antenna with a semi-circular gap (44×40×0.2 mm) on polyimide, ideal for ISM, 4G, 5G, Bluetooth, and WLAN uses. S. Suneesh et al. [4] proposed a compact, flexible PTFE-based wearable antenna for 5G IoT, achieving triple-band operation at 2.52, 3.8, and 5.58 GHz

Design of Proposed Antenna Structure. The antenna is a foam-based, wearable microstrip patch design with a 1.6 mm thick substrate, dielectric constant (ε_r) of 1.07, and loss tangent (tanδ) of 0.0025 [5, 6]. Foam is chosen for its low cost, availability, and flexibility to integrate with clothing. The design is simulated and optimized in Ansys HFSS for desired performance.

Design parameters of the microstrip patch antenna [7] are given below:

Step 1. Calculation of Width of Microstrip Patch Antenna:

$$w = \frac{C_0}{2fr \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (1)$$

Step 2. Calculation of effective dielectric constant (ε_{eff}):

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \times \left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Step 3. Calculation of the length extension ΔL , which is given by:

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{r_{eff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{r_{eff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (3)$$

Step 4 Calculation of the length of patch

$$L = \frac{c_0}{2f_p \sqrt{\epsilon_r \epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (4)$$

As per the above equations, the dimension of microstrip antenna are $33.30 \times 35.96 \times 1.6 \text{ mm}^3$.

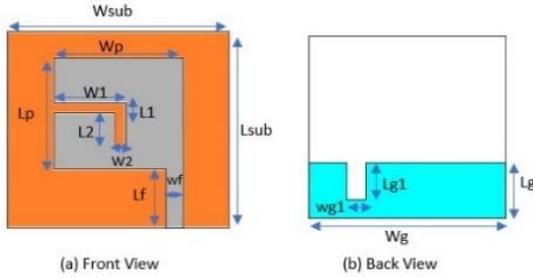


Figure 1 – Geometry of Proposed Rectangular Microstrip Patch Antenna (a) front View (b) Back View

Table 1 – Geometrical parameters of proposed antenna

Parameter	Wsub	Lsub	Wp	Lp	Lf
Value(mm)	61.68	59.019	35.96	33.30	17.74
Parameter	Wf	Lg	Wg	Lg1	Wg1
Value(mm)	4.84	18	61.68	12	6
Parameter	L1	W1	L2	W2	
Value(mm)	3	20	10	3	

Figure 2 shows step by step development of microstrip patch antenna.

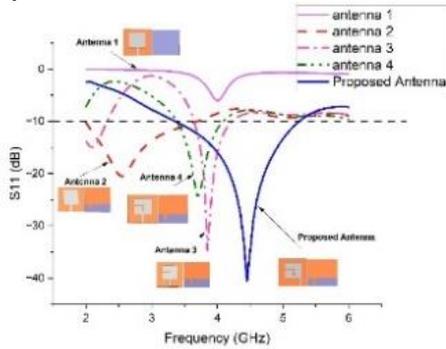


Figure 2 – Return loss performance with variation in geometry

Surface Current Distribution (Figure 3).

SAR Analysis. SAR measures the rate of energy absorption by the human body from EM radiation. Using a three-layer human tissue model, simulated SAR at 4.45 GHz is 0.0012 W/kg for 1 g of tissue, below USA and Europe limits. The SAR is evaluated by Equation (5).

$$SAR = \frac{\sigma X E^2}{\rho}, \quad (5)$$

where SAR = specific absorption rate (in W/kg), σ = conductivity of sample (in S/m), E = electric field in RMS (in V/m), and ρ = density of sample (in kg/m³).

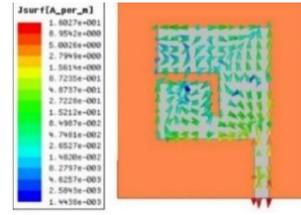


Figure 3 – Surface Current Distubtion at resonating frequency 4.45 GHz

Radiation Pattern (Figure 4).

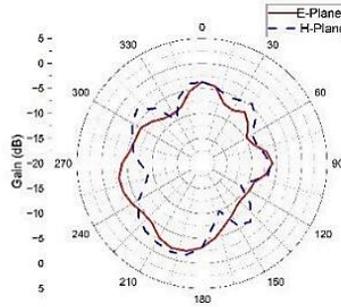


Figure 4 – Simulated radiation pattern in E-plane and H-plane at 4.45 GHz

The three-layer body phantom as shown in Figure 5 of size $90 \times 90 \times 27 \text{ mm}^3$ with 2 mm, 5 mm, and 20 mm thickness for skin, fat, and muscle layer, respectively is simulated in HFSS as shown in Figure 6. The electrical properties of skin, fat, and muscle layers are determined [8, 9] over the frequency of 4.45 GHz

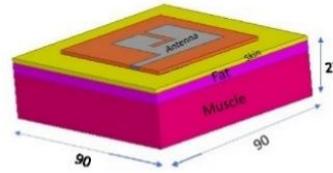


Figure 5 –Three Layer tissue equivalent body phantom model

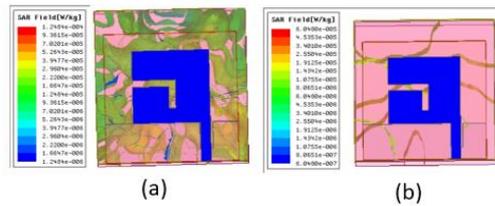


Figure 6 – SAR Analysis of tissue for the three-layer phantom model (a) over 1 gm (b) 10gm

Table 2 – Electrical Properties of Human Tissues

Tissue	Freq	Conductivity σ (S/m)	Permittivity (ϵ_r)	Loss tangent	Mass density (kg/m ³)
Skin (dry)	4.45	2.6502	36.22	0.29556	1109
Fat	4.45	0.20891	5.0814	0.16607	911
Muscle	4.45	3.4611	50.25	0.27823	1090

Conclusion. In this paper, a microstrip patch antenna is designed using Foam substrate. To make good performance of antenna at 3.3GHz to 5.2 GHz various analysis is carried out on patch and ground of antenna.

References

1. Bamy Ce Lakpo. Asymmetric-fed triband antenna for military radars and 5G applications using microstrip technology / Bamy Ce Lakpo, Moukala Mpele Pierre // The Journal of Engineering. – 2022. – № 7. – P. 739–745.
2. Flexible CPW fed transparent antenna for WLAN and sub-6 GHz 5G applications / Desai, Arpan H. [et al.] // Microwave and Optical Technology Letters. – 2020. – № 62. – P. 2090–2103.
3. A Wearable Self-Grounding Slit Antenna for ISM/4G/5G/Bluetooth/WLAN Applications / Yu Zhen [et al.] // IEEE Access, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). – 2023. – P. 87930–37.
4. Design of Flexible and Wearable Antenna for 5G IoT Application / S. Suneesh [et al.] // 3rd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC), Trichy, India, 2022. – P. 402–407.
5. Hatte, J. Dwindle coupled loop antenna system for 5G communication applications / J. Hatte, V. Hendre J. // Commun. Technol. Electron. – 2021. – V. 66. – S100–S108.
6. Karad, Kailash Vaijinath. A Foam-Based Compact Flexible Wideband Antenna For Healthcare Applications // Karad, Kailash Vaijinath, and Vaibhav S. Hendre // Progress In Electromagnetics Research C, The Electromagnetics Academy. – 2022. – P. 197–212.
7. Balanis, Constantine A. Antenna theory: analysis and design. John Wiley & sons, 2016.
8. Dielectric Properties of Body Tissues [Electronic resource]. – Access mode: <http://niremf.ifac.cnr.it/tisprop/htmlclie/htmlclie.php>.
9. A SAR Analysis of Hexagonal-Shaped UWB Antenna for Healthcare Applications / Karad Kailash V. [et al.] // EUR-ASIP Journal on Wireless Communications and Networking. Springer Science and Business Media LLC. – 2024. – № 1.

УДК 796.004

DIGITAL TECHNOLOGIES FOR SUPPORTING THE TRAINING PROCESS IN TENNIS

Chen Shilang, Romashko E., Pantsialeu K.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. This study presents a digital technology for supporting the training process in tennis. It is a broad category encompassing methods of athlete preparation, including physical, tactical, and technical aspects, which are improved through digital technologies. Special attention is given to motion analysis and biomechanics, tracking and performance monitoring systems, virtual and augmented reality (VR and AR) technologies, the use of artificial intelligence and machine learning, wearable devices for physiological monitoring. The paper also provides a review of the literature on the topic of using digital technologies in the training process in tennis.

Key words: digital technology, electronic tools, training control in tennis.

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ТРЕНИРОВОЧНОГО ПРОЦЕССА В БОЛЬШОМ ТЕННИСЕ

Чен Шиланг, Ромашко Е. Д., Пантелеев К. В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В данном исследовании представлены цифровые технологии, используемые в поддержке тренировочного процесса в теннисе. Это широкая категория, охватывающая методы подготовки спортсменов, включая физические, тактические и технические аспекты, которые совершенствуются с помощью цифровых технологий. Особое внимание уделяется анализу движения и биомеханике, системам отслеживания и контроля производительности, технологиям виртуальной и дополненной реальности (VR и AR), использованию искусственного интеллекта и машинного обучения, носимым устройствам для мониторинга физиологического состояния спортсменов. Также представлен обзор литературы по теме использования цифровых технологий в тренировочном процессе по теннису.

Ключевые слова: цифровые технологии, электронные средства, тренерский контроль в теннисе.

*Адрес для переписки: Pantsialeu K., Prospekt Nezavisimosti, 65, Minsk 220113, Republic of Belarus
e-mail: k.pantsialeu@bntu.by*

The training process for tennis players is a broad category encompassing methods of athlete preparation, including physical, tactical, and technical aspects, which are improved through digital technologies. Digital technologies have become a critical part of training in tennis, helping coaches and athletes enhance performance, monitor progress, and reduce injuries. Among the most relevant digital technologies are the following:

- motion analysis and biomechanics;
- tracking and performance monitoring systems;

- virtual and augmented reality (VR and AR) technologies;
- the use of artificial intelligence and machine learning;
- wearable devices for physiological monitoring.

Using high-speed cameras and sensors allows for a detailed analysis of player technique. In tennis, this can be particularly useful for optimizing movements in serves, forehands, and backhands. These data help correct technical errors, improve injury resistance by identifying excessive strain, develop individual

strategies, and adjust technique. In [1, 2] many examples of video analysis applications.

Systems such as Hawk-Eye use cameras and AI to track the ball's trajectory and player movements. This is used to analyze the ball's speed and trajectory, athlete positioning, movements, and player reaction to the opponent's actions. Sections of the book [3] dedicated to tracking systems in tennis.

VR/AR training allows for simulating game situations, training reactions, and developing strategic skills. In tennis, it enables players to virtually practice complex game situations, improve their response to opponents' shots and anticipation, and develop strategies against specific opponents. The book [4] includes include a recent study on the application of VR/AR in sports training

AI algorithms can analyze data from previous matches to suggest strategies based on the opponent's actions and the athlete's own playing style. AI applications help coaches plan training considering the player's weaknesses, analyze the style and tactics of opponents, and optimize workload and recovery. In a book [5] provides comprehensive guide to using AI for sports data analysis).

Tennis players increasingly use smartwatches, wristbands, and special sensors to monitor heart rate and oxygen levels, track physical exertion and fatigue, and

recover after intensive training A book [6] analyzing the use of wearable devices in sports science.

Digital technologies used to analyze and optimize the training process in tennis constitute a more focused area, concentrating on specific digital tools and methods: tracking systems, video monitoring, biomechanical analysis, software for data analysis, as well as VR/AR technologies. These technologies are already significantly transforming tennis training, making it more precise, effective, and safe.

References

1. Duane V. Knudson. Biomechanical Principles of Tennis Technique. Using Science to Improve Your Strokes / Duane V. Knudson. – Racquet Tech Pub. – 2006. – 136 p.
2. George K. Hung. Biomechanical Principles and Applications in Sports / George K. Hung, Jani Macari Parris, Jill L. McNitt-Gray. – Springer, 2019. – 321 p.
3. Matt Dicks. Professional Advances in Sports Coaching. Research and Practice / Matt Dicks, Richard Thelwell. – Taylor & Francis, 2018. – 458 p.
4. Keengwe, J. Handbook of Research on Virtual Training and Mentoring of Online Instructors / J. Keengwe. – IGI Global, 2018. – 511 p.
5. Artificial Intelligence in Sport Performance Analysis / Duarte Araújo [et al.]. – Taylor & Francis, 2021. – 220 p.
6. Sensors and Wearable Technologies in Sport. Technologies, Trends and Approaches for Implementation / Daniel A. James, Nicola Petrone. – Springer, 2016. – 49 p.

UDC 006.91.004

EXPERIMENTAL STUDY ON THE POSSIBLE EFFECTS OF MOBILE PHONE BACKGROUND LIGHT ON HUMAN BODY

Zhang Yun

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Long-term use of mobile phones may lead to health risks. This study tests the background light of mobile phone screens. Based on the experimental results, the author makes preliminary calculations, analyses and evaluations on the blue light hazards and insomnia problems that mobile phones may cause, and gives relevant suggestions.

Key words: mobile phone background light, brightness, spectrum, blue light hazards.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ФОНОВОГО СВЕТА МОБИЛЬНОГО ТЕЛЕФОНА НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

Чжан Юнь

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Длительное использование мобильных телефонов может привести к рискам для здоровья. В этом исследовании проверяется фоновый свет экранов мобильных телефонов. На основе экспериментальных результатов автор делает предварительные расчеты, анализы и оценки опасностей синего света и проблем с бессонницей, которые могут вызывать мобильные телефоны, и дает соответствующие предложения.

Ключевые слова: фоновый свет мобильного телефона, яркость, спектр, опасность синего света.

*Address for correspondence: Zhang Yun, Prospekt Nezavisimosti, 65, Minsk 220113, Republic of Belarus
e-mail: 1184206721@qq.com*

Electronic display devices (electronic watches, smart phones, computers, televisions, screens, etc.) have become a part of human social life. While transmitting information, they also have an impact on people's physiology and psychology.

As a prelude to this article, the author conducted a questionnaire survey on people of all ages from various countries, and one of the main conclusions was that mobile phones are currently the electronic device with the longest use time and the most frequent use.

Table 1 – Brightness test results

Background Light	Brightness, cd/m ²
Red	24,32
Orange	104,28
Yellow	132,28
Green	61,35
Blue	61,84
Indigo	10,33
Purple	62,05
White	166,10

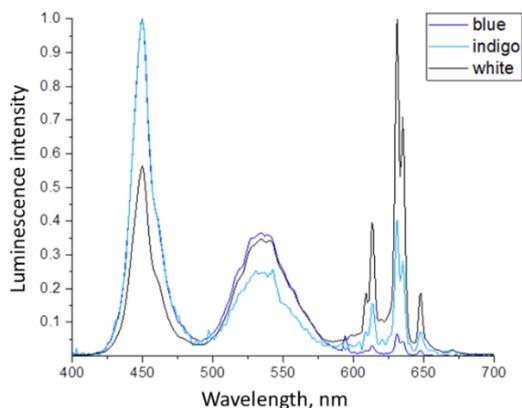


Figure – Relative spectral distribution of smartphone screen radiation: blue, indigo and white

Although studies have pointed out the potential health risks of prolonged mobile phone use [1–3], public awareness of this issue is still insufficient. Many people develop the habit of using their mobile phones in bed at night due to their busy work schedule during the day. This behavior pattern may lead to difficulty falling asleep, disruption of the biological clock, and may accelerate vision loss due to exposure to blue light emitted by the screen.

Based on this, the author conducted a systematic test on the background light of mobile phone screens and measured the brightness and spectral distribution of 8 colors of background light. The experiment was conducted in a dark room, simulating the use of mobile phones in a dark room at night. According to the formula provided by IEC 62471 [4], the blue light hazards that may be caused by the background light of mobile phones were calculated and analyzed, and

conclusions were drawn and corresponding suggestions were given.

The test results of brightness are shown in Table, and the relative spectral distributions of three (8 in total) types of mobile phone background lights are shown in Figure.

To prevent photochemical damage to the retina exposed to blue light for long periods of time, the spectral radiance energy of the light source and the blue hazard weighted function $B(\lambda)$, i. e. the blue light weighted luminance L_B , should not exceed $10^6 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}) (t \leq 10^4 \text{ s})$ or $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}) (t > 10^4 \text{ s})$. The formulas are as follows:

$$L_B \cdot t = \sum_{300}^{700} \sum_t L_\lambda(\lambda, t) \cdot B(\lambda) \cdot \Delta t \cdot \Delta \lambda \leq 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} (t \leq 10^4 \text{ s}), \quad (1)$$

$$L_B = \sum_{300}^{700} \sum_t L_\lambda(\lambda, t) \cdot B(\lambda) \cdot \Delta \lambda \leq 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} (t > 10^4 \text{ s}), \quad (2)$$

where the blue light hazard weighted curve $B(\lambda)$ adopts the data given in GB/T 20145-2006 [5], and its peak wavelength is at 437 nm.

References

1. Mushroor, S. The impact of smart phones and mobile devices on human health and life / S. Mushroor, S. Haque, A. A. // Riyadh International Journal of Community Medicine and Public Health. – 2020. – № 1. – P. 9–15.
2. Maregu, N. Long term exposure of mobile phone radiation and human health / N. Maregu // Journal of Information Engineering and Applications. – 2016. – № 6 (8). – P. 22–30.
3. Bhargavi, K. Mobile phone radiation effects on human health / K. Bhargavi, K. E. Balachandrudu, Nageswar P. // International Journal of Computational Engineering Research. – 2013. – № 3(4): 196-203.
4. ГОСТ Р МЭК 62471-2013 (IEC 63471: 2006) «Светобиологическая безопасность ламп и ламповых систем».
5. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of The People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 20145-2006 Photobiological Safety of Lamps and Lamp Systems // Beijing: Standards Press of China. – 2006.

УДК 796.004

APPLICATION OF ELECTRONIC MEANS IN COACHING CONTROL OF VOLLEYBALL
He Kanghui, Borbat M., Samaryna A., Pantsialeu K.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article explores the application of electronic tools in coaching control for volleyball competitions, including video analysis, biomechanical systems, physical activity trackers, as well as the use of artificial intelligence and statistical analysis. Key areas of technology application are described, such as tactical and technical evaluation, physical condition monitoring, and training process individualization. The relevance of this research is substantiated by factors such as increased sports competition, workload individualization, advancements in sports medicine, and the growing accessibility of digital technologies. The article identifies key research tasks, including the development of video analysis models, assessment of wearable sensor effectiveness, AI-based game situation prediction, and the impact of electronic tools on team interaction and psychological preparation. The conclusion highlights the importance of integrating advanced technologies to enhance the training process efficiency and ensure athlete safety.

Key words: digital technology, electronic tools, training control in volleyball.

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ В ТРЕНЕРСКОМ КОНТРОЛЕ СОРЕВНОВАНИЙ
ПО ВОЛЕЙБОЛУ**

Хи Кангхай, Борбат М. С., Самарина А. В., Пантелеев К. В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассматривается применение электронных средств для тренерского контроля в соревнованиях по волейболу, включая видеоанализ, биомеханические системы, трекары физической активности, а также использование искусственного интеллекта и статистического анализа. Описаны основные направления применения технологий, такие как оценка тактики и техники, мониторинг физического состояния и индивидуализация тренировочного процесса. Уточняются причины актуальности этих исследований, среди которых повышение уровня конкуренции в спорте, индивидуализация нагрузок, развитие спортивной медицины и рост доступности цифровых технологий. Выделены ключевые задачи исследования, включая разработку моделей для видеоанализа, оценку эффективности носимых датчиков, использование ИИ для прогнозирования игровых ситуаций и изучение влияния электронных средств на командное взаимодействие и психологическую подготовку. Делается вывод о значимости интеграции передовых технологий для повышения эффективности тренировочного процесса и обеспечения безопасности спортсменов.

Ключевые слова: цифровые технологии, электронные средства, тренировочный контроль в волейболе.

Адрес для переписки: Pantsialeu K., Prospekt Nezavisimosti, 65, Minsk 220113, Republic of Belarus
e-mail: k.pantsialeu@bntu.by

The use of electronic tools for coaching control in volleyball competitions is essential for enhancing the efficiency of the training process and optimizing game strategies. Modern electronic tools enable coaches to collect and analyze large amounts of data, which helps improve both individual and team performance. The main areas of technology application in volleyball include the following [1, 2]:

– Video Analysis and Game Situations Review: Programs for recording and analyzing matches help coaches assess tactics, identify errors, and highlight the strengths of players and the team as a whole. This enables coaches to adjust strategies based on objective data. Popular video analysis programs in sports include Dartfish, Hudl, and Coach's Eye.

– Biomechanics and Kinematics Analysis Systems: Specialized sensors and cameras assess the precision, speed, and efficiency of movements. This data helps coaches optimize the technique of key volleyball elements, such as spikes and jumps, which is critical for injury prevention and technical training

improvement. Systems like Vicon and Kistler are commonly used for biomechanical data collection.

– Trackers and Physical Activity Monitoring Sensors: Wearable devices and sensors (e. g., heart rate monitors, GPS trackers) allow coaches to monitor heart rate, workload, and player fatigue levels in real-time. This information aids in setting optimal rest and training intervals for each athlete, reducing the risk of overtraining and enhancing training effectiveness. Popular trackers include Polar and Catapult.

– Tactical Analysis with Artificial Intelligence (AI): Modern AI-based systems can analyze video data and assist coaches in predicting the behavior of players and opponents. AI systems can design tactical schemes, forecast outcomes of various strategies, and help make more informed decisions during matches.

– Statistical Analysis Software: Applications enable coaches to track detailed statistics on various game parameters – such as serves, pass accuracy, blocks, and more. Programs like DataVolley and

VolleyStats provide statistical tracking and analysis, highlighting areas in need of improvement.

These technologies assist coaches in assessing players' conditions and progress, making them an essential tool for maintaining high standards of preparation and team competitiveness.

Relevance of Research in the Use of Electronic Tools in Coaching Control for Volleyball Competitions.

The relevance of research into the application of electronic tools in volleyball coaching control is underscored by several factors, tied to the general trend toward digitalization and increased performance expectations in sports. Key relevance aspects include:

– Increased Competition Levels in Sports: Modern sports, including volleyball, demand a high level of physical and technical readiness. Given the narrow gap between elite teams, using electronic tools for game and training data analysis has become a significant factor in gaining a competitive edge.

– Individualization of the Training Process: Electronic devices enable the collection and analysis of data for each player individually, crucial for identifying strengths and weaknesses, predicting physical conditions, and managing workload levels. Such data assists in creating personalized training and rehabilitation programs, thereby improving each player's performance and reducing injury risks.

– Enhanced Tactical Training: Video and match data analysis allows coaches to develop more effective tactical schemes, vital in volleyball where team synchronization is crucial. AI-based software can process vast data volumes, enabling opponent action analysis and tactic prediction, an essential component of competition preparation.

– Technological Advances and Accessibility: – Modern technologies such as AI, data analysis, and video monitoring are becoming increasingly accessible and accurate, allowing their use not only at the professional level but also in amateur sports. This contributes to the widespread use of electronic tools and heightens the importance of research into their adaptation for sports.

– Advances in Sports Medicine and Physiology: Systems that monitor physiological parameters like heart rate, fatigue levels, and recovery assist coaches in optimizing workloads and preventing injuries, particularly in high-intensity and contact sports. Utilizing this data can extend athletes' careers and enhance resilience to physical stress.

– Integration with Educational and Research Processes: The application of electronic tools in sports is an important topic in sports science and education. Research in this area opens new avenues for developing training methodologies, managing training processes, and educating future coaches and sports analytics specialists.

The research goal is to analyze and justify the use of electronic tools and information technologies for coaching control in volleyball competitions.

The key research tasks include:

– Developing and Testing Video Analysis Models for Game Tactics and Technique Evaluation: The goal is to create efficient video analysis models that allow coaches to quickly and accurately analyze game situations, identify errors, and adjust tactics. Tasks may involve selecting optimal algorithms for movement and tactical scheme analysis.

– Assessing the Effectiveness of Wearable Sensors and Trackers in Training and Competition: This task involves analyzing how sensors (e.g., heart rate, GPS) influence training load management and injury prevention. The study could reveal how objective data on athletes' physical states help individualize training loads and reduce the risk of overtraining.

– Analyzing the Impact of Electronic Tools on Player Tactical Training: This task examines how using video and analytical programs affects players' tactical understanding. This may include developing training methods based on video and data analysis to enhance players' ability to adapt to tactical schemes.

– Researching the Use of AI for Predicting Game Situations: The goal is to study AI's potential for match data analysis and prediction of team and opponent behavior. Tasks may include the development and testing of algorithms that help coaches adapt tactics in real-time based on game flow.

– Developing Recommendations for Using Biomechanical Systems to Analyze Movement Technique: This task may involve studying how biomechanical systems (e.g., motion sensors and angular velocity sensors) help refine player techniques, particularly for jumps, serves, and blocks. The study could provide recommendations for reducing injuries by optimizing techniques.

Each of these tasks can be supported by methods and tools [3] that ensure analytical precision and objectivity, with results that broaden the understanding of electronic tool applications in volleyball and other team sports.

Conclusion. The integration of advanced technologies improves the efficiency and safety of the sports process, thereby enhancing team performance and contributing to sports science development. It opens new approaches to training management and athlete preparation.

References

1. Collins, D. Performance psychology: A practitioner's guide / D. Collins, A. Button, R. Richards. – England: Oxford, 2011. – 812 p.
2. Computer Science in Sport: Research and practice; ed. By A. Baca. – London: Routledge, 2015. – 237 p.
3. Routledge Handbook of Sports Performance Analysis; ed. by T. McGarry, P. O'Donoghue, J. Sampaio. – London: Routledge, 2015. – 512 p.

УДК 628.74

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПЫТАНИЯМ СИСТЕМ ПРОТИВОДЫМНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

Антошин А. А.¹, Галузо В. Е.², Пинаев А. И.²

¹Белорусский национальный технический университет

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Даны анализ и практические рекомендации по совершенствованию нормативно-правовых актов, в области проектирования и аэродинамических испытаний систем противодымной вентиляции.

Ключевые слова: система противодымной вентиляции, аэродинамические испытания, практические рекомендации.

PRACTICAL GUIDELINES FOR TESTING SMOKE VENTILATION SYSTEMS

Antoshin A.¹, Haluzo V.², Pinaev A.²

¹Belarusian State Technical University

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. An analysis and practical recommendations are given for improving regulations in the field of design and aerodynamic testing of smoke ventilation systems.

Key words: smoke ventilation system, aerodynamic tests, practical recommendations.

Адрес для переписки: Галузо В. Е., ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: valga51@yandex.ru

Согласно [1] в зданиях высотой 30 м и более, а также в зданиях высотой менее 30 м, предназначенных для эвакуации более 50 человек следует предусматривать удаление продуктов горения при пожаре системами вытяжной противодымной вентиляции (СПДВ).

Данные системы предназначены для обеспечения незадымляемости путей эвакуации при пожаре, что очевидно обеспечивает эвакуацию людей в кратчайшие сроки.

Однако, при практической реализации этой системы могут иметь место проблемы обратного характера. В частности, снижение давления в коридоре этажа пожара за счет систем дымоудаления, при увеличении (или неизменной величине) давления в незадымляемой лестнице в следствии притока воздуха в нее может привести к тому, что двери на пути эвакуации из коридора в лестницу будет трудно открыть.

Это обстоятельство хорошо известно. Поэтому в [1] оговаривается такой параметр перепада давления на закрытой двери пути эвакуации, который связан с усилием открывания двери. Согласно [1] значение этого давления не должно превышать 150 Па.

Однако, этот параметр не дает точного представления о величине той силы, с которой открывается дверь при пожаре поскольку давление равно силе, действующей на единицу площади (в данном случае площади дверного полотна). Поскольку размеры (площадь) дверного полотна могут быть разными, то и усилие открывания двери могут быть разными. Поэтому правильнее было бы нормировать усилие открывания двери на пути эвакуации, которого нет в нормативно-правовом акте по проектированию СПДВ [1].

Поскольку в соответствии с [2] СПДВ подлежат обязательным аэродинамическим испытаниям при выполнении пусконаладочных работ, то с каким усилием открываются двери на пути эвакуации определяют инженеры аккредитованных лабораторий, которые проводят эти испытания в соответствии с [2].

По предложению этих лабораторий в новую редакцию [2] введен параметр «усилие открывания дверей на путях эвакуации», значение которого равно 300 Н [2]. Эта величина коррелируется с перепадом давления 150 Па. Так при размерах дверного проема на пути эвакуации 0,9×2,1 м, площадь дверного полотна ≈ 2 м, а значит, усилие открывания ≈ 300 Н.

В [2] приведены методические указания по замеру усилия открывания двери и типовая схема приложения усилия. Усилие измеряется динамометром, прикрепленным к механизму открывания (дверной ручке на схеме) расположенному горизонтально.

Измерения должен производить один человек. При измерениях должна быть дана количественная оценка, то есть измерено фактическое значение усилия. Но если усилие составит величину большую 300 Н, сможет ли один человек его преодолеть и выдержит ли это усилие дверная ручка.

Согласно [3] усилие, прикладываемое к полотну дверного блока для его открывания, не должно превышать 75 Н. Это может означать, что дверная ручка эту силу, приложенную к ней, должна выдерживать. При этом не сказано, что дверные ручки дверей на пути эвакуации должны выдерживать усилие 300 Н. Это и не будет нигде сказано, потому что двери на пути эвакуации открываются в направлении эвакуации и ручку тянуть не надо.

В [2] сказано, что с целью исключения влияния устройств для самозакрывания дверей до

включения СПДВ должна проводиться проверка усилия открывания дверей, но что с ним делать дальше ничего не сказано.

В связи с вышеизложенным предлагается следующая последовательность измерения усилия открывания двери на пути эвакуации.

До включения СПДВ измерить усилие открывания двери F_d по методике, приведенной в [2], измеренное значение сопоставить с нормируемым в [3]. В случае несоответствия указать в протоколе испытаний для его устранения.

Затем измерить размеры дверного полотна и определить его площадь $S_{дп}$.

После чего включив СПДВ, измерить перепад давления на закрытой двери пути эвакуации $P_{зд}$.

Зная усилие F_d , площадь $S_{дп}$ и давление $P_{зд}$, определить усилие открывания двери на пути эвакуации при включенной СПДВ $F_{дв}$ по формуле $F_{дв} = F_d + P_{зд} \cdot S_{дп}$.

Литература

1. СН 2.02.07–2020. Противодымная защита зданий и сооружений при пожаре.
2. НПБ 23–2010. Противодымная защита зданий и сооружений. Методы испытаний.
3. СТБ 2433–2015. Блоки дверные. Общие технические условия.

УДК 681.2.084

ТРЕБОВАНИЯ К ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ КАМЕРЫ ТОЧЕЧНОГО ДЫМОВОГО ПОЖАРНОГО ИЗВЕЩАТЕЛЯ

Антошин А. А., Третьяк И. Б.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Конструкция дымовых оптико-электронных пожарных извещателей должна обеспечивать высокую чувствительность и устойчивость к ложным срабатываниям. В работе приведен анализ результатов компьютерного трехмерного моделирования конструкции дымовой камеры пожарного извещателя.

Ключевые слова: пожарный извещатель, дымовая камера, точность изготовления, качество, конструкторская база.

REQUIREMENTS FOR THE PRECISION OF MANUFACTURING THE OPTICAL CAMERA OF A POINT SMOKE FIRE DETECTOR

Antoshyn A., Tratsiak I.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The design of smoke optical-electronic fire detectors must ensure high sensitivity and resistance to false alarms. The paper presents an analysis of the results of computer three-dimensional modeling of the design of the smoke chamber of the fire detector.

Key words: fire detector, smoke chamber, manufacturing precision, quality, design base.

Адрес для переписки: Антошин А. А., Третьяк И. Б., ул. Я. Коласа, 22, г. Минск 220013, Республика Беларусь, e-mail: Aantoshyn@bntu.by

Дымовая камера (рисунок 1) является основной частью дымового пожарного извещателя и в общем случае состоит из источника излучения, приемника излучения и элементов конструкции, влияющих на распространение лучей. К таким элементам относятся входная и выходная диафрагмы, световые ловушки и заслонки.

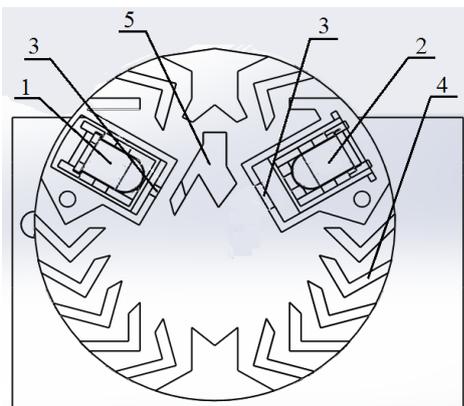
При этом форма и взаимное расположение всех составных частей должно обеспечить срабатывание фотоприемника в случае появления дыма в камере и исключить засветку при работе в штатном режиме [1].

С этой целью особое внимание при разработке конструкции уделяется обеспечению взаимного расположения всех составных элементов камеры, что определяет назначение допускаемых интервалов отклонения размеров от номинальных значений.

На начальном этапе компьютерного анализа. В качестве объекта исследования рассмотрена дымовая камера оптического интерактивного пожарного извещателя модели ИП 212-02К «ДОКА-с» [2]. Были выполнены трехмерные модели отдельных деталей прототипа [3, 4], составляющих дымовую камеру с учетом заявленной точности изготовления, соответствующей десятому качеству [5]. А также был разработан макет печатной платы, в отверстия которой устанавливаются держатели свето- и фото-диодов и корпус дымовой камеры.

При этом было выявлено, что позиционирование отверстий в плате, в соответствии с современными технологиями, определяется координатным методом с допуском, соответствующим классу платы, а размеры сопрягаемых выступов корпуса и держателей заданы в линейном виде с допуском, соответ-

ствующим возможностям литья. В качестве конструкторских баз для корпуса назначена центральная ось, а для держателей – ось симметрии.



1 – источник излучения; 2 – приемник излучения;
3 – диафрагма; 4 – ловушка; 5 – заслонка

Рисунок 1 – Расположение элементов в дымовой камере пожарного извещателя

Из-за этого, при моделировании сборочных операций обнаружены несовпадения осей отверстий и выступов сопрягаемых поверхностей, что влечет погрешность взаимной установки деталей при монтаже.

Для устранения выявленного недостатка предлагается заменить конструкторские базы для корпуса и держателей на центральную ось одного из сопрягаемых выступов, расположение остальных выступов задать с помощью координат, в соответствии с расположением отверстий на плате.

В ходе дальнейшего макетирования было рассмотрено распространение излучения от узконаправленного инфракрасного светодиода IR333-A [6] в дымовой камере. При этом обнаружено, что все элементы дымовой камеры расположены на значи-

тельном удалении от формируемого пучка и не препятствуют его распространению. Имеется возможность снизить требования по точности изготовления элементов камеры с десятого на четырнадцатый квалитет, что приведет к уменьшению затрат на изготовление пресс-формы для литья и, следовательно, к снижению себестоимости изделия.

Литература

1. Влияние конструктивных особенностей дымовых пожарных извещателей на их чувствительность к дымам различной природы / И. Е. Зуйков [и др.] // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Третьей международной научно-технической конференции : в 2 т. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: Б. М. Хрусталева, Ф. А. Романюк, А. С. Калинин. – Минск : БНТУ, 2006. – Т. 1. – С. 217–219.
2. ТУ ВУ 100016872.098-2016. Извещатель пожарный дымовой оптический интерактивный ИП 212-02К «ДОКА-с». Технические условия.
3. Третьяк, И. Б. Применение средств трехмерного моделирования при конструировании оптических элементов приборов систем безопасности / И. Б. Третьяк, Г. И. Олефир // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 11-й Международной научно-технической конференции. Т. 2. – Минск: БНТУ, 2013. – С. 192.
4. Третьяк, И. Б. Параметрическое моделирование пространственной области пространства сложной формы / И. Б. Третьяк, А. А. Антошин // Новые направления развития приборостроения : материалы 17-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов, 17–19 апреля 2024 года, Минск, Республика Беларусь / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: О. К. Гусев (пред. редкол.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2024. – С. 62.
5. ГОСТ 25347–2013 (ISO 286-2:2010). Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Ряды допусков, предельные отклонения отверстий и валов.
6. Technical Data Sheet 5mm Infrared Emitting Diode IR333-A. Everlight Electronics Co., Ltd.

УДК 681.2.084

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ФАКТОРОВ ПОЖАРА ЗА ПРЕДЕЛАМИ ОБЛАСТИ ГОРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ ОТ БЕСПЛАМЕННОГО К ПЛАМЕННОМУ

Антошин А. А.¹, Никитин В. И.²

¹Белорусский национальный технический университет

²НИИ ПБиЧС МЧС Беларуси

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Обоснована необходимость проверки мультикритериального извещателя, использующего сложные алгоритмы работы для повышения информативности на способность обнаруживать тестовые пожары, моделирующие переход горения от беспламенного к пламенному.

Ключевые слова: мультикритериальные пожарные извещатели, тестовый пожар, методы контроля, горение, тление, пламя, пиролиз, переход тления в пламенное горение.

DYNAMICS OF CHANGES IN FIRE FACTORS OUTSIDE THE COMBUSTION AREA UNDER CONDITIONS OF TRANSITION FROM FLAMELESS TO FLAME COMBUSTION

Antoshyn A.¹, Nikitin V.²

¹Belarusian National Technical University

²Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry of Emergency Situations of Belarus

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The necessity of testing a multi-criteria detector, using complex operating algorithms to increase information content, for the ability to detect test fires simulating the transition of combustion from flameless to flaming is substantiated.

Key words: multicriteria fire detectors, test fire, control methods, combustion, smoldering, flame, pyrolysis, transition from smoldering to flaming combustion.

Адрес для переписки: Антошин А. А., ул. Я. Коласа, 22, г. Минск 220013, Республика Беларусь

e-mail: Aantoshyn@bntu.by

Острота проблемы, связанная с уменьшением ущерба от пожаров на защищаемых объектах, с течением времени не уменьшается. Очевидно, что важнейшим средством уменьшения ущерба от пожаров является его своевременное обнаружение, а для своевременного обнаружения пожара огромное значение имеет совершенство пожарных извещателей, используемых в пожарной сигнализации. Современным бурно развивающимся направлением совершенствования пожарных извещателей является использование мультикритериального метода обнаружения пожара. Выходной сигнал такого пожарного извещателя формируется в результате математической обработки информации, получаемой от разных первичных измерительных преобразователей, измеряющих величины, характеризующие окружающую воздушную среду. Алгоритм обработки этих сигналов может быть жестким, выбираемым или программируемым согласно [1]. Кроме того, алгоритм работы извещателя по результатам обработки измерительной информации может формировать два типа сигналов «ПОЖАР» и «ВНИМАНИЕ» [2]. Сигнал «ПОЖАР» формируется только при условии роста температуры и наличии в помещении угарного газа. При увеличении оптической плотности среды и наличии угарного газа формируется сигнал «ВНИМАНИЕ». Он может быть заменен на сигнал «ПОЖАР» в случае обнаружения роста температуры. Использование двух типов выходных сигналов позволило повысить информативность мультикритериального извещателя так как

появляется возможность разделить опасные пламенные пожары и беспламенные пожары, который сопровождаются выделением дыма и СО. Он не столь опасен на ранних стадиях и достаточно только привлечь внимание к потенциальной опасности. Опасные быстро протекающие пожары требуют немедленной реакции подразделений МЧС.

В настоящее время испытание мультикритериальных извещателей проводится с использованием стандартного набора тестовых пожаров [1]. Однако при использовании сложных алгоритмов работы извещателя и его повышенной информативности проверить такие возможности извещателя с применением стандартных тестовых пожаров не представляется возможным. Для решения таких задач требуются тестовые пожары, моделирующие переход горения от беспламенного к пламенному. Данная работа нацелена на изучение характеристик окружающей среды за пределами области горения в условиях перехода от беспламенного к пламенному горению.

Процессам перехода тления к пламенному горению посвящены работы [3, 4]. Заметим, что динамика факторов пожара в области горения при переходе тления к пламенному горению достаточно хорошо изучена.

Вторая группа факторов пожара, которая характеризует окружающую среду за пределами области горения и в большинстве случаев регистрируется пожарными извещателями тоже исследована достаточно хорошо для большинства тестовых пожаров, используемых при испытании

пожарных извещателей [5, 6]. Впервые о исследовании параметров окружающей среды в условиях развития в помещении сложного пожара с переходом тления в пламенное горение сообщается в работе [7]. В работе контролировались следующие параметры окружающей среды: оптическая плотность, температура, концентрация монооксида углерода. Авторы [8] установили, что после воспламенения образца поток оптического излучения, рассеянного дымом, уменьшается при сохранении скорости увеличения удельной оптической плотности задымленной среды, что подтверждает тот факт, что при пламенном горении образующиеся более мелкие частицы дыма меньше рассеивают оптическое излучение.

В работе [9] разработана методика, с помощью которой можно выполнять одновременное исследование динамики изменения концентрации угарного газа, удельной оптической плотности, рассеивающей способности в одной и той же области окружающей среды, содержащей продукты горения, при переходе пиролиза в пламенное горение древесины или писчей бумаги. Показано, что при переходе пиролиза в пламенное горение древесины и листов писчей бумаги концентрация угарного газа, температура, удельная оптическая плотность и рассеивающая способность окружающей среды, содержащей продукты горения, изменяются одновременно. Автор работы [10] исследовал метод управления процессом перехода тления в пламенное горение используя подачу в область горения потока воздуха из окружающего пространства. Показано, что дополнительный приток воздуха обеспечивает воспламенение массивных образцов из сосны и хлопковых дисков. В работе приводятся экспериментальные зависимости от времени удельной оптической плотности, концентрации угарного газа и температуры под потолком помещения при пиролизе, переходящем в тление и затем в пламенное горение.

В литературе отсутствует информация о характере изменения динамики факторов пожара, характеризующих окружающую среду за пределами области горения при переходе тления или пиролиза к пламенному горению.

Выводы. Выполненный анализ позволяет сделать заключение о том, что для испытания мультикритериальных пожарных извещателей, имеющих сложный алгоритм работы, позволяющий распознавать тип горения, необходим тестовый

пожар моделирующий переход от беспламенного к пламенному горению.

Показано, что значения оптической плотности под потолком помещения в момент перехода от беспламенного к пламенному горению уменьшаются по величине.

Литература

- ГОСТ 34698–2020 Межгосударственный стандарт. Извещатели пожарные. Общие технические требования. Методы испытания.
- Антошин, А. А. Управление каналами измерения в мультикритериальном пожарном извещателе / А. А. Антошин, О. А. Протасевич // *Приборостроение-2015: материалы 8-й международной научно-технической конференции*, Минск, 25–27 ноября 2015 г.: в 2 т. – Минск, 2015. – Т. 1. – С. 39–41.
- Babrauskas, V. Full scale burning behavior of upholstered chairs. National Bureau of Standards, NBS Technical Note. – 1979. – № 1103.
- Palmer, K. N. Smoldering combustion of dusts and fibrous materials. *Combustion and Flame*. – 1957. – № 1. – P. 129–154.
- Grosshandler, W. L. A Review of Measurements and Candidate Signatures for Early Fire Detection NISTIR 5555. – 1995. – № 32.
- Jackson, M. A. Gas Sensing for Fire Detection: Measurements of CO, CO₂, H₂, O₂ and Smoke Density in European Standard Fire Test / M. A. Jackson, I. Robins // *Fire Safety Journal*. – 1994. – № 22. – P. 181–205.
- Никитин, В. И. Влияние толщины образца на тип горения древесины тестового пожара для контроля мультисенсорных пожарных извещателей / В. И. Никитин, А. А. Антошин // *Новые направления развития приборостроения: материалы 10-й международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов*, Минск, 26–28 апреля 2017 г.: в 2 т. – Минск, 2017. – Т. 1. – С. 13.
- Антошин, А. А. Тестовый пожар на основе древесины, моделирующий условия перехода тления в пламенное горение / А. А. Антошин, В. И. Никитин // *Приборостроение–2018: материалы 11-й Международной научно-технической конференции*, 14–16 ноября 2018 года, Минск, Республика Беларусь – Минск: БНТУ, 2018. – С. 497–499.
- Антошин, А. А. Методика исследования динамики параметров задымленной среды при переходе пиролиза в пламенное горение / А. А. Антошин, В. И. Никитин // *Приборы и методы измерений*. – 2019. – Т. 10, № 4. – С. 382–390.
- Никитин, В. И. Совершенствование методики исследования динамики изменения параметров задымленной среды при переходе пиролиза в пламенное горение материалов // *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация*. – 2023. – № 2(54). – С. 143–151.

УДК 621.383

ПОЛЕВОЙ ФОТОТРАНЗИСТОР

Воробей Р. И., Гусев О. К., Свистун А. И., Тявловский А. К., Тявловский К. Л.,
Шадурская Л. И.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Описана структура и основные характеристики полевого фототранзистора. Применение полупроводников с многозарядной примесью позволяет реализовать качественно новый состав преобразовательных характеристик, с возможностью их управления дополнительным оптическим управляющим сигналом.

Ключевые слова: полевой фототранзистор; полупроводник; многозарядная примесь; управление характеристикой чувствительности; широтно-импульсная модуляция.

FIELD PHOTOTRANSISTOR

Vorobey R., Gusev O., Svistun A., Tyavlovsky A., Tyavlovsky K.,
Shadurskaya L.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The structure and basic characteristics of the field phototransistor are described. The use of semiconductors with a multi-charged admixture allows you to realize a qualitatively new composition of the transformative characteristics, with the possibility of controlling their additional optical control signal.

Key words: field phototransistor; semiconductor; multifaceted admixture; control of the characterization of sensation; width -pulse modulation.

*Адрес для переписки: Тявловский К. Л., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by*

В качестве основы для построения различных сенсоров широко используются структуры на основе полевых транзисторов. Наиболее распространены фотоприемные и ионоселективные приборы, биосенсоры, оптические биосенсоры [1]. Основные преимущества таких структур обусловлены высоким входным сопротивлением наряду с низким выходным, причем длина проводников, связывающих чувствительный электрод с каналом, изменяющим свое сопротивление под действием входного воздействия, равна нулю. Это делает такие приборы практически нечувствительными к влиянию электромагнитных полей.

Новые свойства таким структурам могут быть приданы при использовании в качестве основы для транзисторной структуры полупроводников с собственной фотопроводимостью, слабо легированных глубокими примесями, формирующими в запрещенной зоне несколько энергетических уровней с разными зарядовыми состояниями [2]. Особенности физических процессов перезарядки этих уровней обеспечивают комплекс новых качественных характеристик на функциональном уровне. Хотя многозарядный примесный М-центр может содержать от 0 до М электронов и соответственно, находиться в (М + 1) различных зарядовых состояниях, само существование активного уровня и энергетический спектр многозарядной примеси определяется занятостью уровней центра и не может быть представлено набором независимых уровней. При захвате электронов вышележащим уровнем, энергия нижележащего

уровня уже не может проявиться из-за сильного взаимодействия между двумя электронами центра и их неразличимости. Заполненность уровней примеси в разных зарядовых состояниях, управляемая дополнительным оптическим сигналом, переключает диапазоны энергетической и спектральной преобразовательных характеристик. При изменении зарядового состояния примеси, например, под действием оптического излучения, время жизни и скорость рекомбинации носителей заряда, определяющие преобразовательные характеристики сенсора, могут быть изменены на несколько десятичных порядков [2, 3].

При использовании наиболее распространенных пар основного материала и многозарядной примеси реализуется спектральная чувствительность сенсора в ближнем и среднем ИК-диапазоне [3]. Это, например, позволяет использовать такие структуры для создания датчиков глюкозы на основе методов неинвазивной абсорбционной спектроскопии [1–3].

Реализация биосенсоров и фотоэлектрических датчиков на основе структуры полевого транзистора возможна в различных конструктивных исполнениях. Одна из конструкций приведена на рисунке 1. Фактически это традиционная структура полевого транзистора с «обратной» засветкой. При этом, в зависимости от свойств материала и используемого спектрального диапазона чувствительности может потребоваться различная толщина материала, что, например, может быть реализовано при полной толщине материала

подложки, или при утончении области полупроводника в зоне оптической чувствительности [2, 4].

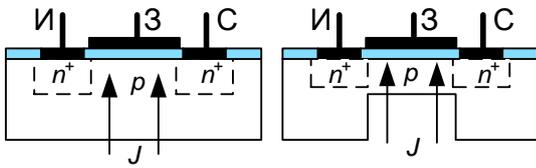


Рисунок 1 – Конструкция полевого фототранзистора

Если активная область обогащена, то фотоэффекты проявятся не будут; фоточувствительность структуры будет наблюдаться только при нахождении активной области в состоянии обеднения. При этом дополнительной подсветкой можно изменять вид спектральной характеристики чувствительности, переключая значение «красной» границы [2, 3]. Еще одним проявлением фоточувствительности сенсорной структуры полевого транзистора является смещение характеристик полевого транзистора (рисунок 2), что приводит к смещению сток-затворной характеристики и изменению значения напряжения отсечки при изменении освещенности активной области. Отметим также, что вывод затвора может быть использован как управляющий электрод, так и как электрод-контакт с исследуемой жидкой средой (биологическим объектом), например, через иммерсионную жидкость [1].

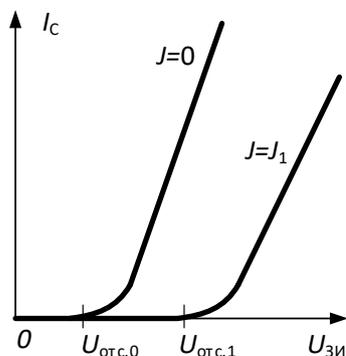


Рисунок 2 – Смещение характеристик полевого фототранзистора при освещении

Таким образом, в представленной структуре реализуется функциональная зависимость умножения преобразовательных характеристик управления проводимостью канала электрическим полем через затвор и управления проводимостью освещением. При этом, крутизна характеристик управления интенсивностью оптического излучения и спектральная характеристика чувствительности, в случае использования полупроводника с

многозарядной примесью, зависит от интенсивности дополнительного управляющего излучения.

Для реализации линейной функции управления энергетической и спектральной характеристиками чувствительности можно использовать управление заселенностью энергетических уровней многозарядной примеси внешним управляющим оптическим излучением методом широтно-импульсной модуляции, причем амплитуда интенсивности управляющего оптического излучения должна быть более верхнего порога управляющей характеристики. Если частота изменения измерительного сигнала не превышает частоты управляющего ШИМ сигнала, то среднее значение коэффициента преобразования полевого фототранзистора будет определяться скважностью управляющего ШИМ сигнала. Применение ШИМ позволяет плавно и по линейному закону изменять наблюдаемое эффективное время жизни носителей заряда, следовательно, и определяемый этим временем параметр преобразовательной характеристики.

Использование структур на основе полупроводникового материала с глубокой многозарядной примесью позволяет формировать функциональные сенсоры с чувствительностью к физическим факторам различной физической природы, [1, 2]. Применение ШИМ регулирования для управления коэффициентами преобразования путем изменения соотношения включенных в работу энергетических уровней в разных зарядовых состояниях позволяет управлять свойствами сенсора непосредственно в чувствительной области приборной структуры [5], что реализует управление во всем возможном диапазоне коэффициентов преобразования без снижения абсолютной чувствительности.

Литература

1. Бурункова, Ю. Э. Сенсорные системы и материалы / Ю. Э. Бурункова, Е. О. Самуйлова. – СПб: Университет ИТМО, 2023. – 117 с.
2. Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors with Intrinsic Photoconductivity / R. I. Vorobey [et al.], // Devices and Method of Measurements. – 2021. – № 2. – P. 108–116.
3. Многопараметрические измерительные преобразователи систем оптической диагностики на основе функциональных датчиков / Р. И. Воробей [и др.] // Не разрушающий контроль и диагностика – 2023. – № 1. – С. 37–45.
4. Масол, И. В. Информационные нанотехнологии / И. В. Масол, В. И. Осинский, О. Т. Сергеев. – Киев: Макрос, 2011. – 560 с.
5. Управление характеристиками фотоэлектрических преобразователей на основе полупроводников с многозарядной примесью / Р. И. Воробей [и др.] // Приборостроение: материалы 16 МНТК, Минск, 17–19 ноября 2023 г., БНТУ. – Минск, 2023. – С. 39–40.

УДК 004.93, 535.317, 548.732,634.1:535-34

ПОЛУЧЕНИЕ ЦИФРОВЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ СНИМКОВ СЕМЯН ПЛОДОВО-ЯГОДНЫХ КУЛЬТУР

Балухо И. Н.¹, Дудчик Ю. И.¹, Кухарчик Н. В.², Кольчевский Н. Н.¹

¹НИУ «Институт прикладной физический проблем имени А. Н. Севченко» БГУ

²РУП «Институт плодоводства» НАН Беларуси

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Предложено использование метода разностной съемки для получения изображений внутренней структуры семян плодово-ягодных культур. Выполнены экспериментальные исследования по получению цифровых рентгеновских снимков семян вишни и сливы, методом разностной съемки.

Ключевые слова: рентгеновское излучение; разностная съемка; рентгеновские снимки семян.

DIGITAL X-RAY IMAGES OF FRUIT AND BERRY SEEDS

Balukho I.¹, Dudchik Y.¹, Kukharchik N.², Kolchevsky N.¹

¹A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems BSU

²RUE "Institute of Fruit Growing" NAS of Belarus

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Proposes the use of the method of difference imaging to obtain images of the internal structure of seeds of fruit and berry crops. Performed experimental studies on obtaining digital X-ray images of cherry and plum seeds, by the method of difference imaging.

Key words: X-ray emission; difference imaging; X-rays of seeds.

Адрес для переписки: Кольчевский Н. Н., ул. Курчатова 7–403, 220045, Минск, Республика Беларусь
e-mail: kolchevsky@bsu.by

Семена как биологические объекты являются сложными многокомпонентными, многопараметрическими нелинейными системами. Современный уровень научных исследований в семеноведении требует применения инструментальных физических методов, позволяющих получить детальную информацию как о внешних, так и внутренних характеристиках структурной целостности семени. На сегодняшний день рентгенография является единственным стандартизованным инструментальным методом, применяемым для решения данной задачи [1].

Разработанный метод разностной съемки, используется для получения изображений слабо-поглощающих рентгеновское излучение объектов [2]. Основу метода составляет получение двух изображений объекта при изменении углового положения, и формирование разностного изображения. Метод разностной съемки направлен на обнаружение границ объектов, которые существенно изменяют пропускание при угловом повороте объекта.

Получение цифровых рентгеновских изображений плодово-ягодных культур выполнялось с помощью экспериментальной установки (рисунок 1). Установка содержит: источник рентгеновских лучей в виде рентгеновской трубки с медным анодом (рисунок 1 – слева) и цифровую рентгеновскую камеру (рисунок 1 – справа), объект исследования размещен вблизи камеры (рисунок 1 – сверху). Изображение было записано с помощью рентгеновской камеры Photonic Science.

Размер рабочей области рентгеновской камеры составляет 18×12 мм², число пикселей равно 4008×2670. Размер пикселя камеры составляет 4,5 мкм. При съемке объекта использовалась функция биннинга, которая позволяет объединять несколько пикселей камеры в один.



Рисунок 1 – Фотография экспериментальной установки

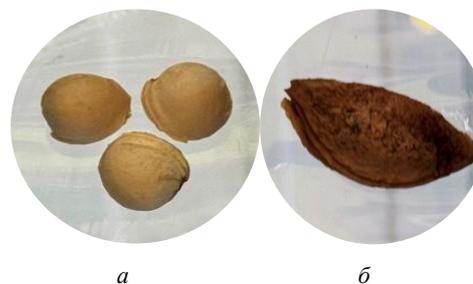
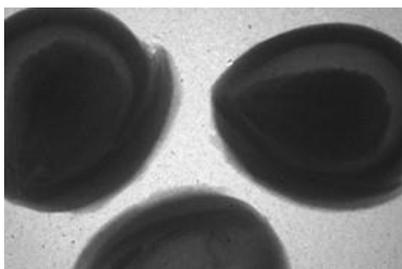
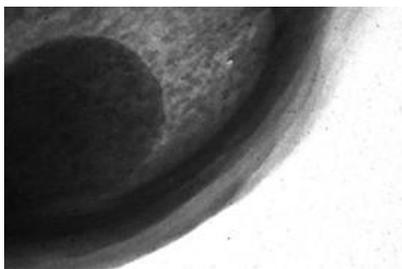


Рисунок 2 – Исследуемые семена плодово-ягодных культур: вишни (а) и сливы (б)



a



б

Рисунок 3 – Рентгеновская фотография семян вишни (*a*) и сливы (*б*)

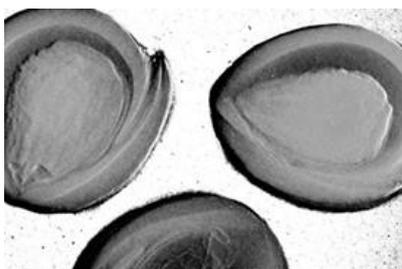
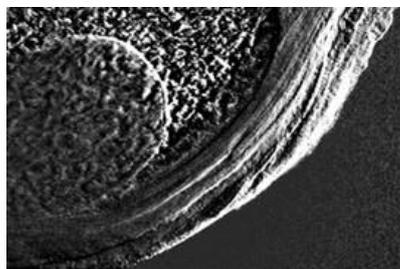


Рисунок 4 – Рентгеновская изображение семян вишни после обработки

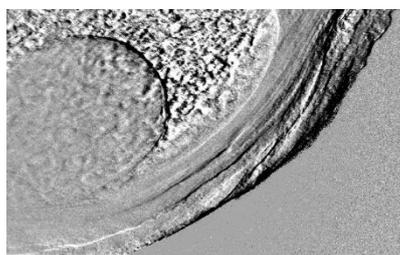
Выполнены экспериментальные исследования по получению цифровых рентгеновских снимков семян плодово-ягодных культур: вишни и сливы (рисунок 2). Расстояние от источника до объекта составляло $l_1 = 440$ мм, расстояние от объекта до детектора – $l_2 = 10$ мм. Рабочее напряжение на аноде рентгеновской трубки составляло 27 кВ, анодный ток – 4 мА.

На рисунке 3, *a* и *б* показаны полученные рентгеновские снимки семян вишни и сливы. На рисунках 4 и 5 показаны результаты разностной съемки, при углах поворота на 1 градус. Видно,

что при увеличении угла поворота, размер контрастного изображения возрастает, и повышается резкость элементов внутренней структуры семян, что также отчетливо видно на позитивном и негативном изображении (рисунок 5).



a



б

Рисунок 5 – Рентгеновская изображение семян сливы после обработки: негативное (*a*) и позитивное (*б*) изображение

Благодарности. Работа частично поддержана Министерством образования Республики Беларусь в рамках задания 3.12 ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», подпрограмма «Техническая диагностика».

Литература

1. Рентгеновские компьютерные методы исследований структурной целостности семян и их значение в современном семеноведении / М. В. Архипов [и др.], ЖТФ. – 2019. – № 89 (4). – С. 627–638.
2. Дудчик, Ю. И. Цифровая рентгенография слабопоглощающих рентгеновское излучение объектов / Ю. И. Дудчик, А. А. Субач // Приборостроение-2022: материалы 15-й Международной научно-технической конференции, 16-18 ноября 2022 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2022. – С. 22–23.

УДК 620.179.142.6

РАЗМЕРЫ ИНФОРМАТИВНОЙ ЗОНЫ ОПТИМИЗИРОВАННЫХ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Булатов О. В.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В докладе представлены полученные методом конечных элементов результаты расчетов глубины и радиуса информативной зоны магнитодинимических преобразователей, предназначенных для толщинометрии никелевых покрытий. Все преобразователи имеют стальные корпуса с оптимизированными по толщине стенками, содержащие неодимовые цилиндрические магниты разного диаметра.

Ключевые слова: информативная зона, магнитная толщинометрия, магнитодинимический метод, никелевое покрытие.

THE DIMENSIONS OF THE INFORMATIVE AREA OF THE OPTIMIZED MAGNETO-DYNAMIC TRANSDUCERS

Bulatov O.

*Institute of Applied Physics
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. In the paper the calculation results obtained by the finite element method, of depth and radius of the informative area of the magneto-dynamic transducers that intended for thickness measuring of nickel coatings are presented. All of the transducers have steel cases with walls that optimithed by thickness, containing the neodim cylindrical magnets with different diameter.

Key words: informative area, magnetic thickness measuring, magneto-dynamic method, nickel coating.

*Адрес для переписки: Булатов О. В., ул. Академическая, 16, г. Минск, 220072, Республика Беларусь.
e-mail: lab1@iaph.bas-net.by*

Ранее [1] на примере магнитодинимического преобразователя с цилиндрическим корпусом из низкоуглеродистой стали, содержащим десяти-миллиметровый неодимовый магнит, были расчетным путем (методом конечных элементов) оптимизированы толщины обеих стенок корпуса. Установлено, что при использовании оптимизированного преобразователя для толщинометрии никелевых покрытий, нанесенных на неферромагнитные основания, краевой эффект становится минимальным. Затем аналогичные оптимизационные расчеты были проведены для преобразователей с магнитами меньших диаметров [2]. На следующем этапе расчетов была исследована взаимосвязь между оптимальными толщинами обеих стенок стального корпуса с диаметром расположенного в нем магнита в диапазоне значений от 1 до 10 мм [3]. Результаты проведенного исследования следует использовать при конструировании оптимизированных преобразователей с магнитами разных диаметров для толщинометрии никелевых покрытий в диапазонах с различными верхними пределами (вплоть до 1000 мм).

В настоящем докладе рассмотрены результаты дальнейшего применения метода конечных элементов, позволившие определить глубину и радиус информативной зоны оптимизированных преобразователей. Информация о глубине необходима для выбора магнита с наименьшим диаметром, при котором преобразователь еще может измерять толщину никелевых покрытий контро-

лируемых изделий в заданном диапазоне ее значений. Сведения о радиусе необходимы при разработке не только методики контроля толщины покрытий, но и, в первую очередь, методики проверки или калибровки толщиномера с оптимизированным преобразователем, предполагающей использование набора мер с покрытиями, имеющими очень ограниченную площадь поверхности. Ограничение площади неизбежно в силу того, что достаточно трудно (или даже технически невозможно) выполнить довольно жесткие требования к качеству поверхности покрытия, имеющей чрезмерно большую площадь.

На рисунке 1 приведен график зависимости глубины $Z_{из}$ информативной зоны магнитодинимического преобразователя со стальным корпусом, обе стенки которого оптимизированы по толщине, от диаметра D неодимового магнита, расположенного в этом корпусе. Значения данного диаметра представлены в диапазоне от 1 до 10 мм, охватывающем практически все случаи возможного применения указанного преобразователя для толщинометрии никелевых покрытий.

Из графика на рисунке 1 следует, что зависимость $Z_{из}(D)$ монотонно возрастает во всем рассматриваемом диапазоне значений диаметра D . Этого и следовало ожидать, так как рост D неизбежно влечет за собой увеличение интенсивности первичного магнитного поля преобразователя. Оптимизированные по толщине стенки корпуса максимально усиливают эту тенденцию.

Относительно плавный рост зависимости $Z_{ИЗ}(D)$ объясняется в первую очередь тем, что материал покрытия (никель) по мере углубления в него силовых линий магнитной индукции первичного поля все более равномерно распределяет (т. е. рассеивает) их по горизонтали.

На рисунке 2 показана зависимость минимального радиуса $R_{ИЗ\ min}$ информативной зоны вышеуказанного преобразователя от диаметра D , диапазон значений которого остался прежним.

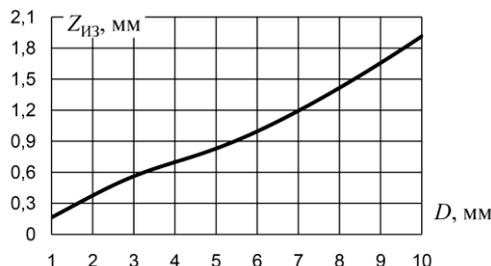


Рисунок 1 – Зависимость глубины $Z_{ИЗ}$ информативной зоны оптимизированного магнитодинамического преобразователя от диаметра D неодимового магнита

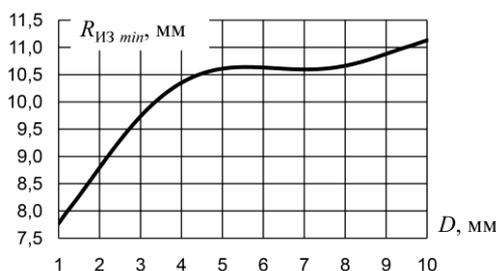


Рисунок 2 – Зависимость минимального радиуса $R_{ИЗ\ min}$ информативной зоны оптимизированного магнитодинамического преобразователя от диаметра D неодимового магнита

На данном графике изображена уже совсем другая тенденция, характеризующая изменение радиуса $R_{ИЗ\ min}$ с увеличением диаметра D . Видно, что сначала зависимость $R_{ИЗ\ min}(D)$ быстро и почти линейно возрастает, однако потом скорость ее роста падает до нуля, а после $D > 5,5$ мм наблюдается даже малозаметное уменьшение $R_{ИЗ\ min}$. После $D = 7$ мм снова начинается уверенный почти линейный рост $R_{ИЗ\ min}$, однако скорость этого роста явно меньше скорости в начале диапазона значений D .

Такая тенденция объясняется тем, что радиус $R_{ИЗ\ min}$, зависящий в первую очередь от диаметра D , во многом зависит от внешнего диаметра стального корпуса и оптимальной толщины $H_{опт}$ его вертикальной стенки. Из графика взаимосвязи толщины $H_{опт}$ с диаметром D [3] следует, что с его ростом толщина $H_{опт}$ резко убывает на участке от

порогового значения $D_{пор} = 4,4$ мм до конца диапазона значений D . Именно после значения $D_{пор}$ скорость роста радиуса $R_{ИЗ\ min}$ стремительно падает до нуля. Когда влияние дальнейшего увеличения диаметра D оказывается сильнее влияния уменьшения толщины $H_{опт}$, радиус $R_{ИЗ\ min}$ начинает снова возрастать, причем со все большей скоростью, которая увеличивается до конца диапазона значений D . На рисунке 2 равенство $R_{ИЗ} = R_{ИЗ\ min}$ справедливо при любом диаметре D , а невыполнение равенства $H = H_{опт}$ неизбежно приводит к увеличению радиуса $R_{ИЗ}$.

Зависимость $Z_{ИЗ}(D)$ необходимо знать заранее, чтобы можно было создать магнитодинамический преобразователь с основными конструктивными элементами, размеры которых оптимальны для заданного диапазона измерений толщины никелевых покрытий. Такая оптимизация позволяет в каждом практическом случае обеспечить минимальный радиус $R_{ИЗ\ min}$, что приводит к минимально возможному для этого случая краевому эффекту.

Знание зависимости $R_{ИЗ\ min}(D)$ позволяет избежать увеличения погрешности, которое может иметь место в первую очередь при калибровке или проверке магнитодинамических толщиномеров никелевых покрытий.

Обе зависимости необходимы для вычисления объема информативной зоны, позволяющего оценить уровень ее намагниченности, от которого зависит крайне важная для магнитной толщинометрии дополнительная погрешность, обусловленная структурным состоянием никеля.

Литература

1. Булатов, О. В. Оптимизация размеров корпуса преобразователя магнитодинамического толщиномера с целью минимизации краевого эффекта / О. В. Булатов // Приборостроение – 2021 : материалы 14-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 17–19 ноя. 2021 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол. : О.К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 33–35.
2. Булатов, О. В. Выбор оптимальных толщин стенок стальных корпусов магнитодинамических преобразователей / О. В. Булатов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 21–22 апр. 2022 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2022. – С. 311–312.
3. Булатов, О. В. Взаимосвязь оптимальных толщин стенок стального корпуса с диаметром неодимового магнита преобразователя для толщинометрии никелевых покрытий / О. В. Булатов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 20–21 апр. 2023 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2023. – С. 317–318.

УДК 616-76

ИНТЕРАКТИВНЫЙ КОРРЕКТОР ОСАНКИ

Габец В. Л., Бондаренко В. А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной работе было проведено исследование в области корректоров осанки и реклинаторов, выявлены основные особенности применения и недостатки существующей модели интерактивного корректора осанки, предложена модернизация компонентов.

Ключевые слова: корректор осанки, реклинатор, обратная связь, датчик изменения угла наклона, интерактивный.

INTERACTIVE POSTURE CORRECTOR

Habets V., Bondarenko V.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. In this paper, a study was carried out in the field of posture correctors and reclinator, the main features of application and disadvantages of the existing model of interactive posture corrector were identified, modernisation of components was suggested.

Key words: posture corrector, reclinator, feedback, tilt sensor, interactive.

Адрес для переписки: Бондаренко В. А., ул. Кабушкина 45–32, г. Минск 220118, Республика Беларусь
e-mail: vladka.bond7@gmail.com

В наши дни проблема нарушения осанки и роста числа людей с заболеваниями позвоночника актуальна как никогда раньше. В зависимости от степени искривления позвоночника, плоскости, в которой это изменение перешло в патологическое, врач может назначить в качестве лечения корсетотерапию. Однако корсеты подразумевают под собой жесткие ортезы туловища, доставляющие дискомфорт носителю. Для профилактики ухудшения осанки и прогрессирования заболеваний предлагают использовать корректоры осанки.

Корректор осанки – это устройство, предназначенное для улучшения и поддержания правильной осанки путем выравнивания позвоночника, плеч и шеи. Конструктивно может представлять собой изделие из переплетенных между собой тканевых вставок и металла либо же пластика, оказывающих давление на определенные точки туловища; пояса на поясницу, кольца на шею со встроенным датчиком изменения угла наклона [1].

На рисунке 1 показаны различные виды корректоров осанки.



Рисунок 1 – Виды корректоров осанки

Постоянное ношение помогает со временем переобучить мышечную память тела, что облегчает поддержание правильной осанки, даже когда устройство не надето, также способствует уменьшению болей и дискомфорта в шее, плечах и пояснице, которые обычно связаны с плохой осанкой. Распрямление позвоночника влияет на улучшение дыхательной функции и ускорение кровообращения.

Помимо представленных на рисунке 1 корректоров осанки в связи с распространением использования технологии 3D-печати создано устройство в виде позвоночного столба, корректирующее осанку, оснащенное датчиком изгиба, который измеряет наклон позвоночника вперед, тогда как другой датчик измеряет боковое движение тела. Новый механизм с гидравлическим приводом осуществляет движение скелета позвоночника. Скелет, вдохновленный оригами, способен имитировать движение настоящего позвоночника. Под отрицательным давлением скелет конструирует правильный изгиб позвоночника. Алгоритм внутри микроконтроллера обрабатывает данные с датчика и управляет приводом. Простой производственный процесс делает конструкцию пригодной для индивидуального производства.

При проектировании корректоров осанки учитывают следующие факторы:

- регулятивность. Устройство не должно ограничивать диапазон движений. Используются регулируемые ремни для того, чтобы люди различной комплекции и роста могли подстроить корректор под себя.

- материалы. Высококачественные материалы гарантируют, что корректор осанки прослу-

жит дольше и выдержит регулярное использование. Рекомендуются дышащие материалы, которые не будут вызывать избыточного трения или потоотделения и которые легко стираются, например, пеньковая или нейлоновая ткань.

– портативность. Изделие не должно быть громоздким, так как это увеличивает дискомфорт при ношении и надевании. Сейчас разрабатывают корректоры осанки, по форме и размеру напоминающие таблетку. Пример такого устройства показан на рисунке 2.



Рисунок 2 – Интерактивный корректор осанки

Такой малогабаритный корректор осанки представляет собой поликарбонатный трекер, состоящий из датчика-гироскопа, в последствии можно добавлять и акселерометр, чтобы расширить функционал корректора и сделать подобие «умных» часов, и магнитную пластину. Весь трекер действует как кнопка, которую вы нажимаете, чтобы запрограммировать и использовать.

Устройство должно располагаться примерно на 3 сантиметра ниже ключицы, при этом трекер должен быть прижат к коже или к нижней рубашке, а магнитная пластина – с другой стороны. Таким образом его можно прикреплять к одежде. Обработка сигналов с датчиков происходит в приложении на телефоне, тем самым обеспечивается обратная связь с пользователем, посему такой корректор и называют интерактивным. Пациент либо доктор может собирать статистику об изменении положения осанки. Но изначально при первом надевании пациент фиксирует правильный угол наклона позвоночника. После калибровки вибрация либо световой сигнал оповестят об успешном завершении. В течении дня при изменении осанки устройство будет подавать выбранные сигналы, однако только при пребывании в неправильном положении дольше определенного временного интервала.

Устройства такого типа работают, «определяя кривизну в верхней части позвоночника, в дополнение к положению плеч, груди и верхней части спины». Каждый раз, когда оно калибруется, обращается внимание на то, как человек держит свое тело, и постоянно проверяет позу для отслеживания осанки верхней части тела, то есть верх-

ней части позвоночника, плеч и груди. Другое носимое устройство для отслеживания осанки, помещенное на талии и пояснице может отслеживать осанку нижней части тела, включая нижнюю часть позвоночника и таз [2].

Изучив существующие конструкции можно выделить ряд преимуществ интерактивных корректоров осанки: малые габариты, которые позволяют человеку самостоятельно надевать изделие и не препятствуют движениям человека в отличие от бандажных корректоров; простота использования – принцип действия «кнопки» не составит сложности при эксплуатации пользователем; многофункциональность, выраженная в возможности добавлять к трекеру оптические датчики для измерения кислорода в крови, электродов для снятия электрокардиограммы и прочих (функции «умных» часов); интерактивность – возможность отслеживать свои результаты позволяет носителю улучшить контроль над осанкой и психологически адаптировать себя к ежедневному ношению. Наличие приложения на телефоне обеспечивает возможность обработки результатов, снятых с датчиков, выбора сигнала-предупреждения либо определенное число вибраций, либо звуковой сигнал, либо световой сигнал, отслеживания прогресса.

Таким образом интерактивный корректор осанки, несмотря на относительно малую распространенность среди потребителей, – заслуживающее внимание изделие, которое может использоваться не только для лечения заболеваний позвоночника, но и профилактики неправильной осанки и связанных с ней болей. Из недостатков существующих конструкций можно выделить ненадежное крепление, осуществляемое магнитом, так как есть риск неплотного прилегания к телу, соответственно неверные данные об угле искривления, и несовместимость с кардиостимулятором. Настройка аппарата должна происходить под контролем врача для обеспечения правильной анатомической позы человека и недопущения вреда здоровью.

Для улучшения предлагается использовать индуктивное зарядное устройство корректоров осанки по аналогии с зарядным устройством беспроводных наушников, а также для усовершенствования эстетической составляющей необходимо создание аксессуаров к устройству, например, силиконовые цветные, принтованные чехлы.

Литература

1. Sarah Mitroff, Lumo Lift review: A posture tracker that puts design over details [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.cnet.com/reviews/lumo-lift-review>. – Date of access: 25.09.2024.
2. Design of a fluid-driven 3D printed spinal posture corrector / G. M. Asadullaha, Nurbol Sabyrovb, M. A. S. Kamala // Journ. Materials Today: Proceedings. – 2021. – V. 44, Part 1, – P. 1555–1559.

УДК 62-597.8

КОНСТРУКЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДАТЧИКА АБС

Горанов И. В.¹, Назарчук К. А.¹, Грабчиков С. С.², Драпезо А. П.³, Лосев А. В.³

¹Белорусский национальный технический университет

²ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»,

³ООО «Научно-технический центр Вист групп сенсор»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе экспериментальным методом исследовалась новая конструкция индуктивного автомобильного датчика АБС на основе плоских элементов магнитной системы – магнитопровода и постоянного магнита. Обнаружен эффект повышения сигнала, индуцируемого датчиком, содержащим разрыв магнитопроводов, что связано с изменениями топологии магнитных полей.

Ключевые слова: датчик АБС, Концентратор магнитного поля, экспериментальный образец.

DESIGN AND CHARACTERISTICS OF THE EXPERIMENTAL ABS SENSOR

Goranov I.¹, Nasarchuk K.¹, Grabchikov S.², Drapeso A.³, Losev A.³

¹Belarusian National Technical University

²SO«SPC NAS of Belarus for Materials Science»

³LLC«Scientific and Technical Center Vist group sensor»

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. In this work, a new design of an inductive automotive ABS sensor based on flat elements of the magnetic system – a magnetic circuit and a permanent magnet – was studied experimentally. The effect of increasing the signal induced by a sensor containing a break in the magnetic circuits was discovered, which is associated with changes in the topology of the magnetic fields.

Key words: ABS sensor, the concentrator of the magnetic field, experimental model.

Адрес для переписки: Грабчиков С. С., ул. Петруся Бровки 19, Минск, 220072, Республика Беларусь

e-mail: sgrabchikov@mail.ru

Введение. Автомобильные датчики АБС (антиблокировочной системы) служат для предотвращения блокировки и пробуксовки колес автомобиля при торможении, что позволяет сохранять устойчивость и управляемость автомобилем при резком торможении, заносе. В настоящее время в автомобильной промышленности используют три основных типа датчиков, основанные на законе электромагнитной индукции, эффектах магнито-резистива и Холла [1]. В настоящей работе исследовали экспериментальную конструкцию индуктивного датчика АБС на основе плоских элементов магнитной системы – магнитопровода и постоянного магнита. Задача разработки – снижение стоимости конструкции за счет применения групповых технологий массового производства.

Методика измерений и конструкция датчика. Промышленные индукционные датчики АБС обычно содержат конусообразный концентратор магнитного поля, цилиндрический постоянный магнит, катушку индуктивности и металлический корпус.

Экспериментальная конструкция датчика, представляет собой 3-х слойную структуру, содержащую: магнитомягкий материал (сплав NiFe) – концентратор магнитного поля, диэлектрик и магнитожесткий материал – постоянный магнит (NdFeB). Слой магнитомягкого материала сформирован по групповой технологии печатных плат на фольгированном стеклотекстолите (слой диэлектрика).

Были изготовлены экспериментальные образцы датчиков АБС с толщиной магнитомягкого материала NiFe 150 мкм (рисунок 1). При этом форма и размер магнитопровода изменялся. Магнитопроводы 1 типа были непрерывными с продольными размерами 42×5 мм³. Магнитопроводы 2, 3 и 4 типов содержали разрыв по длине материала NiFe, при этом площадь поверхности магнитопровода составляла 10 %, 40 %, 80 % от общей площади. Размер постоянного магнита 40×5×1 мм³.

Измерения выполнены на испытательной установке (рисунок 2), имитирующей автомобильное колесо с зубчатым диском из ферромагнитного материала. Частота вращения изменялась в диапазоне от 100 до 1500 об/сек. Комплекс измерительных приборов контролировал параметры индуцируемого датчиком сигнала. Для сравнения также были измерены характеристики индуктивного датчика АБС (производство ОАО «Эталон» г. Борисов).

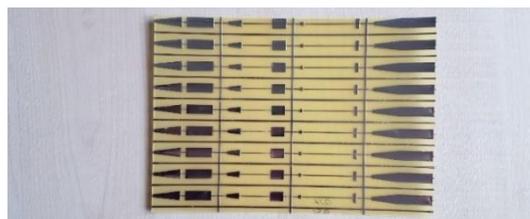


Рисунок 1 – Групповая заготовка с магнитопроводами 4-х типов на основе магнитомягкого материала NiFe



Рисунок 2 – Испытательная установка

Результаты экспериментов. Во время испытаний были измерены значения амплитудного (U_a) и среднеквадратичного (U_2) напряжения, индуцируемого датчиком, при изменении частоты вращения зубчатого диска установки. В таблице 1 приведены полученные результаты.

Таблица 1 – Результаты с толщиной магнитоягкого материала 150 мкм

Площадь магнитного материала	10 %	40 %	80 %	100 %
Частота вращения колеса	1 кГц	1 кГц	1 кГц	1 кГц
U_a	1620 мВ	2360 мВ	2380 мВ	1700 мВ
U_2	568,4 мВ	800 мВ	763 мВ	130 мВ

Приведенные результаты показывают, что значения U_a экспериментальных датчиков с площадью магнитного материала 10 %, 40 %, 80 % и 100 % на частоте 1 кГц составляют 1620; 2360, 2380 и 1700 мВ, соответственно. Значения U_2 экспериментальных датчиков с площадью магнитного материала 10 %, 40 %, 80% и 100 % на частоте 1 кГц составляют 568; 800, 763 и 130 мВ.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что датчик АБС содержащий магнитопровод

с разрывом магнитной цепи обладает более высоким выходным сигналом, чем датчик с непрерывной магнитной цепью – значения U_a при площади 40 и 80 % в 1,38 и 1,4 раз выше, соответственно, чем у датчика с непрерывным магнитопроводом. Повышение эффективности датчиков АБС, содержащих разрыв магнитопроводов, связано с изменениями топологии магнитных полей. В данной конструкции датчика магнитный поток замыкается через 2 контура – концентратор-постоянный магнит и концентратор-зубчатый диск. Введение разрыва в магнитопроводе увеличивает магнитосопротивление материала и изменяет топологию магнитных силовых линий таким образом, что увеличивает магнитный поток через зазор между наконечником концентратора и зубом магнитного диска и снижает магнитный поток через концентратор-постоянный магнит. Данное перераспределение магнитных потоков приводит к увеличению сигнала, индуцируемого в катушке.

По сравнению с датчиком производства ОАО «Эталон» сигнал, индуцируемый экспериментальным датчиком, на порядок ниже. Данное различие может быть существенно снижено путем оптимизации состава и толщины материала магнитопровода.

Доработка конструкции экспериментального датчика АБС и оптимизация материалов в перспективе может улучшить его функциональные характеристики, снизить нижнюю рабочую частоту, повысить конкурентоспособность по сравнению датчиками на основе эффектов магниторезистива и Холла.

Литература

1. Анализ датчиков угловой скорости колес автотранспортных средств / Л. А. Рыжих [и др.] // Автомобильный транспорт. – 2007. – № 21. – С. 7–11.

УДК 628.98

**КОМБИНИРОВАННЫЙ ПРИБОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ
КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСВЕЩЕНИЯ**

Гриц М. А., Савёлов И. Н.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В данной работе представлена разработка схемотехнической части комбинированного прибора для контроля качественных характеристик освещения. Разработан алгоритм прибора, определена оптимальная элементная база.

Ключевые слова: освещенность, источник света, яркость, пульсации света.

COMBINED DEVICE FOR MONITORING THE QUALITY CHARACTERISTICS OF LIGHTING
Hryts M., Savelow I.

*Belarusian national technical university
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The article presents the development of the circuitry part of a combined device for monitoring the quality characteristics of lighting. An algorithm for the device has been developed, and the optimal element base has been determined.

Key words: illumination, light source, brightness, pulsation of light.

*Адрес для переписки: Гриц М.А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: maksimgritz29964112@gmail.com*

Для обеспечения качественного освещения на рабочем месте необходимо учитывать его качественные характеристики – освещенность, яркость и коэффициент пульсаций.

Исследования воздействия пульсирующего света на организм человека показали, что мозг человека воспринимает пульсации света, частотой до 300 Гц. В ходе проведения тех же экспериментов было установлено, что при уровне пульсаций света 5–8 % уже возникают признаки расстройства нормальной электрической активности мозга, а пульсации, глубиной 20 %, вызывают такой же уровень расстройств нормальной активности мозга, как и пульсации освещенности с глубиной 100 %. Также была определена критическая частота пульсаций света 300 Гц, выше которой человеческий организм воспринимает пульсирующий свет как постоянный.

При длительном воздействии пульсации освещенности могут приводить уже к хроническим заболеваниям не только органов зрения, но и сердечно-сосудистой и нервной системы.

Поэтому контроль качественных характеристик освещения необходим обеспечения оптимальных условий для труда и отдыха человека. Качественными характеристиками естественного и искусственного освещения в помещениях являются следующие характеристики: освещенность, коэффициент пульсаций и яркость [1].

В настоящее время для контроля качественных параметров освещения применяются люксометры, пульсометры и яркомеры.

Основным недостатком данных приборов является то, что для определения качественных характеристик освещения необходимо применять отдельные устройства.

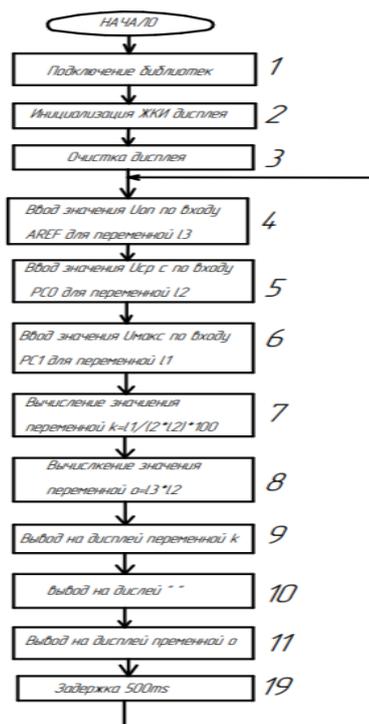


Рисунок 1 – Алгоритм работы устройства

Целью данной работы является разработка схемотехнической части конструкции универсального комбинированного прибора для измерения и контроля качественных характеристик освещения одновременно.

Сложность поставленной задачи заключается в том, что определение качественных характеристик освещения выполняется в соответствии с существующей методикой измерений.

Был разработан алгоритм работы комбинированного прибора для измерения и контроля качественных характеристик освещения.

Алгоритм работы предусматривает одновременное измерение величины освещенности объекта, яркости освещения и расчет коэффициента пульсации.

В соответствии с алгоритмом работы разработана функциональная схема комбинированного прибора (рисунок 1).

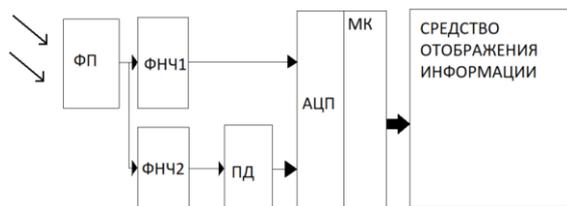


Рисунок 1 – Функциональная схема комбинированного прибора

ФП – фотоприемник, преобразует световой поток в электрический сигнал, фильтр нижних частот ФНЧ 1 выделяет среднее значение светового потока, которое используется как опорное значение и несет информацию о величине светового потока. С помощью пикового детектора ПД и фильтра ФНЧ 2 выделяются пульсации в полосе частот до 300 Гц. Микроконтроллер МК со встроенным модулем АЦП (аналогово цифровой преобразователь) определяет абсолютное значение светового потока и коэффициент пульсаций, и выводит эти значения на средство отображения информации – OLED дисплей. Результаты измерения пульсаций светового потока не зависят от его абсолютной величины, в частности от удаленности осветителя от измерителя.

На основе функциональной схемы была разработана принципиальная электрическая схема разрабатываемого прибора (рисунок 2)

Для корректного отображения информации OLED дисплеем необходимо 8 выводов микроконтроллера. Требуется 2 линии для данных считывания информации с датчика освещения, 1 вход для подключения внешнего опорного напряжения. Требуется узел АЦП со скоростью дискретизации 700 за одну секунду, для производства вычислений с аналоговым сигналом и выводом цифрового. В сумме это составляет 11 выводов.

При выборе типа микроконтроллера установлено, что оптимальным является применение микроконтроллера ATmega8-16PU, 8-Бит, AVR, 16 МГц [2].

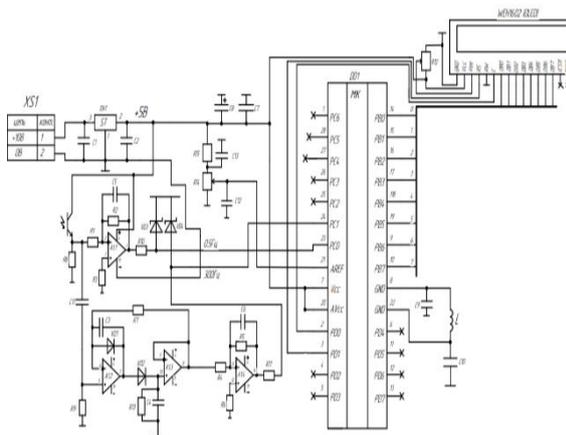


Рисунок 2 – Принципиальная электрическая схема комбинированного прибора

При запуске устройства происходит выработка датчиком освещения сигнала в виде напряжения соответствующего уровню освещения. При помощи ФНЧ1 сигнал U_{\max} сглаживается до частоты 0,5 Гц поступает на микроконтроллер по контакту RC_0 . Через ПК фиксируются пики напряжения и далее через ФНЧ2 сигнал U_{cp} сглаживается до частоты 300 Гц, поступает на микроконтроллера по контакту $PC1$. Значения напряжений U_{\max} , U_{cp} и $U_{оп}$ проходя через узел АЦП преобразуются из аналогового вида в цифровой и присваиваются переменным l_1 , l_2 , l_3 соответственно. Происходит вычисление коэффициента пульсаций $k = l_1 / (2 \cdot l_2) \cdot 100$ измеряемого в процентах и уровня освещенности $o = l_2 \cdot l_3$ измеряемого в люксах. Конечные вычисленные значения коэффициента пульсаций и освещенности выводятся на OLED дисплей в первую строку по контактам МК PB0-PB7 с задержкой 0,5 с. производятся повторные измерения.

Таким образом, в результате проведенных исследований была разработана схемотехническая часть комбинированного прибора для контроля качественных характеристик освещения.

Литература

1. Гриц, М. А. Приборы контроля качественных характеристик освещения / М. А. Гриц, И. Н. Савёлов // Новые направления развития приборостроения: Материалы 16 Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов. – Минск, 2023. – С. 26.
2. МК ATmega8 datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=ATMEGA8>.

УДК 621.311

РАЗРАБОТКА НЕЙРОННОЙ СЕТИ RESNET-18 ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ МЕЖВИТКОВЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ОДНОФАЗНОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ

Громько И. Л., Монархович И. Е.

УО «Белорусский государственный университет транспорта»
Гомель, Республика Беларусь

Аннотация. Разработана нейронная сеть ResNet-18 для диагностики и раннего обнаружения межвитковых коротких замыканий в однофазных трансформаторах. Применение данной нейронной сети позволит в режиме реального времени, не выводя оборудование из работы, анализировать информацию по осциллограммам тока холостого хода и классифицировать короткие замыкания.

Ключевые слова: трансформатор, нейронная сеть, диагностика, алгоритм, межвитковые короткие замыкания.

DEVELOPMENT OF RESNET-18 NEURAL NETWORK FOR DIAGNOSTICS OF INTER-TURN FAULTS IN SINGLE-PHASE TRANSFORMER

Hramyka I., Monarhovich I.

Belarussian State University of Transport
Gomel, Republic of Belarus

Abstract. ResNet-18 neural network has been developed for diagnostics and early detection of inter-turn faults in single-phase transformers. Application of this neural network will allow to analyze information on no-load current oscillograms and classify short circuits in real-time mode without taking the equipment out of operation.

Key words: transformer, neural network, diagnostics, algorithm, inter-turn short circuits.

Адрес для переписки: Громько И. Л., ул. Громовой, 3–27, г. Гомель 246030, Республика Беларусь
e-mail: ivangrom1995@gmail.com

Диагностика трансформаторов сегодня – довольно долгое и затратное мероприятие. Часто необходимо провести целый ряд непростых испытаний, так как современные методы диагностики не всегда однозначно указывают на место и вид дефекта. Надежность электрической машины в значительной степени определяется надежностью обмоток, которая в свою очередь зависит от состояния изоляции. Изоляция работает в сложных, часто весьма неблагоприятных условиях. В процессе эксплуатации электрических машин, а также во время их хранения и транспортировки, они подвергаются разнообразным внешним воздействиям, приводящим с течением времени к прогрессирующему ухудшению свойств изоляции.

Одним из наиболее распространенных следствий ухудшения свойств изоляции являются межвитковые короткие замыкания (МКЗ). При межвитковом замыкании изоляция обмотки нарушается и происходит ее пробой между витками, что впоследствии может привести к выходу из строя трансформатора.

Авторами был предложен и внедрен метод определения межвитковых на основе сверточных нейронных сетей [1].

Для обнаружения МКЗ была разработана нейронная сеть на основе сверточной нейронной сети ResNet-18, для обучения которой использовались осциллограммы тока намагничивания, которые преобразовывались в изображения (рисунок 1), использованные затем для тестирования сверточной нейронной сети.

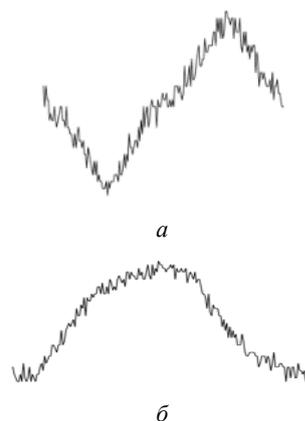


Рисунок 1 – Пример изображения с графиком нормального состояния трансформатора (а), с МКЗ (б)

Для создания изображений для обучения нейронной сети используется следующий алгоритм:

1. Создается массив значений тока, полученных с осциллографа и токоизмерительных клещей.
2. Из каждой позиции массива данных берется 200 следующих значений, которые отправляются в функцию создания изображения.
3. Функция создания изображения с помощью библиотеки Matplotlib создает график и сохраняет его в png-файл.
4. Функция обрезки изображения с помощью библиотеки Pillow обрезает изображение и меняет его размер на приемлемый для нейронной сети.
5. Изображения случайным образом распределяются по папкам train, val и test в соотношении 75 : 24 : 1 соответственно. (В папках train, val и test

находятся изображения для обучения, валидации и тестирования нейросети соответственно.)

Алгоритм повторяется для трех файлов с данными (нормальное состояние, межвитковое короткое замыкание первичной обмотки и межвитковое короткое замыкание вторичной обмотки).

Нейронная сеть принимает на вход черно-белые изображения размером 240×175 пикселей и имеет три выхода, означающие нормальное состояние, межвитковое короткое замыкание первичной обмотки и межвитковое короткое замыкание вторичной обмотки соответственно.

Данные преобразуются в тензоры и нормализуются, после чего начинается обучение и сохранение обученной нейронной сети в рth-файл.

Обучение происходит в 9 эпох, результаты которых показаны в таблице.

Таблица – Пример оформления таблицы

Эпоха	Обучение		Валидация	
	Потери	Точность	Потери	Точность
1	0,025	0,997	0,0178	0,9976
2	0,0142	0,9984	0,0123	0,9984
3	0,0098	0,9989	0,0099	0,9989
4	0,08	0,9991	0,0082	0,9987
5	0,0065	0,9991	0,0075	0,9987
6	0,0059	0,9989	0,0064	0,9992
7	0,005	0,999	0,006	0,9992
8	0,0043	0,9994	0,0054	0,9992
9	0,0038	0,9992	0,0051	0,9992

В результате обучения получена нейронная сеть, способная распознавать межвитковые короткие замыкания с вероятностью 99,92 %.

Использование сверточных нейронных сетей в режиме реального времени позволяет классифицировать различные отклонения, диагностировать виды предаварийного и аварийного состояния. Результаты испытаний для сухих трансформаторов по каждому из повреждений позволили выявить наиболее значимо изменяющиеся параметры экспериментально и создать технологию с применением диагностического оборудования для однозначной классификации дефекта по существующим признакам.

Данная система повышает надежность электроэнергетических систем, так как с помощью нейронных сетей можно отследить неисправности трансформатора в момент их возникновения, что позволит предотвратить различные аварийные ситуации. Наши исследования позволят разработать нейронную сеть, которая будет распознавать данные неисправности.

Литература

1. Hramyka, I. Development of Software and Hardware for Identification of Interturn Short Circuit in Single-Phase Transformers / I. Hramyka // Third International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T), Raipur, India. – 2024. – P. 241–246.

УДК 621.365

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ МЕДИЦИНСКОГО ОДЕЯЛА

Губайдуллина А. В., Смирнова С. В., Благовещенский А. Н.

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ»

Казань, Российская Федерация

Аннотация. Представлены результаты разработки информационно-измерительной системы контроля параметров медицинского одеяла в системе воздушного обогрева пациентов.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, медицинское одеяло, температурный датчик, микроконтроллер.

DEVELOPMENT OF AN INFORMATION AND MEASURING SYSTEM FOR MONITORING THE PARAMETERS OF A MEDICAL BLANKET

Gubaidullina A., Smirnova S., Blagoveshchensky A.

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI
Kazan, Russian Federation

Abstract. The article presents the results of developing an information and measuring system for monitoring the parameters of a medical blanket in a patient air heating system.

Key words: information and measuring system, medical blanket, temperature sensor, microcontroller.

Адрес для переписки: Смирнова С. В., ул. Ак. Глушко, 20А-83, г. Казань 420100, Российская Федерация
e-mail: sv.smirnova@gmail.com

Гипотермия (переохлаждение) является пространственной проблемой в современной медицинской практике. Во время операций гипотермия может развиваться из-за нескольких факторов:

длительного воздействия низких температур в операционной, использование охлажденных инфузий и недостаточной теплоизоляции пациента. В послеоперационный период гипотермия вызывает

риски осложнений у пациентов с нарушенной терморегуляцией, включая нарушения сердечно-сосудистой системы и метаболизма человека.

С целью предотвращения послеоперационных осложнений используется лечение с конвекционным воздушным обогревом. Этот метод обеспечивает поддержание нормальной температуры путем прогревания воздуха через специализированное медицинское одеяло.

На сегодняшний день подобные системы принудительного воздушного обогрева изготавливаются только в зарубежных странах, что создает проблему нехватки отечественных аналогов и необходимость импортозамещения. Растущий спрос на медицинское оборудование открывает возможность развития российской промышленности, способной производить высококачественное медицинское оборудование и изделия. В текущей ситуации в мире, эта тема становится особенно важной и актуальной.

Целью настоящей работы является разработка информационно-измерительной системы медицинского одеяла в системе воздушного обогрева пациентов для контроля параметров одеяла, основанных на оценке величины теплового потока, поступающего от тепловентилятора и проходящего через поры медицинского одеяла. Расчет теплового потока производится по формуле [1]:

$$Q = F \Delta T c \rho,$$

где Q – поток тепла [Вт]; F – поток воздуха [м³/с]; ΔT – температурный градиент между соплом аппарата и окружающим воздухом [°C]; c – удельная теплоемкость воздуха [кДж/(кг·K)]; ρ – плотность воздуха у сопла при текущей температуре [кг/м³].

Для измерения величин температуры теплового потока на поверхности тела пациента и температуры на выходе пор медицинского одеяла необходимо установить соответствующее количество термодатчиков, а также построить систему многоканального сбора и обработки термоизмерительной информации. Макетирование данной системы удобно осуществлять на беспаячной плате, сопрягаемой с микроконтроллером Arduino Uno, управление которым осуществляется посредством программного обеспечения LabVIEW. Система позволяет измерять разность температур, что является необходимым условием для выполнения расчета теплового потока, проходящего через полость медицинского одеяла. Такие параметры как скорость воздушного потока, плотность определяются дополнительными компонентами системы.

На рисунке 1 приведена структурная схема информационно-измерительной системы контроля параметров медицинского одеяла на базе микроконтроллера Arduino UNO

Arduino управляет коммутатором, который, в свою очередь, передает сигналы с датчиков температуры пациента и температуры одеяла на инструментальный усилитель, на выходе которого

формируется сигнал, пропорциональный разности температур. Далее сигнал поступает на интегратор, являющимся центральным аппаратным звеном вольтметра двухтактного интегрирования (ВДИ). Известно, что в ВДИ время второго интегрирования пропорционально входному измеряемому сигналу, который, в свою очередь, пропорционален разности температур. Эта величина преобразуется программно в цифровой эквивалент в среде LabVIEW. Таким образом, после соответствующей обработки на лицевой панели LabVIEW могут быть отображены параметры теплового потока, определяющего характеристики медицинского одеяла.

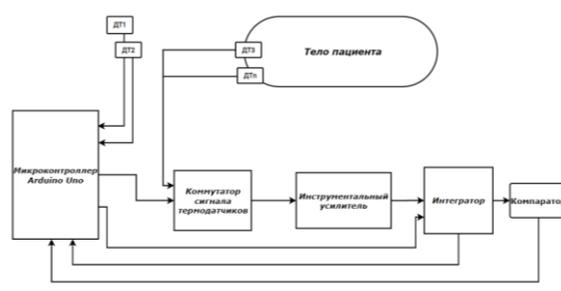


Рисунок 1 – Структурная схема системы

На рисунке 2 приведено фото макетной установки коммутатора сигналов термодатчиков, выполненной на беспаячных платах.

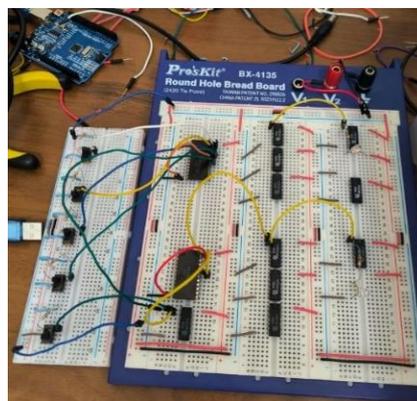


Рисунок 2 – Макет установки коммутатора

Использовались две микросхемы K155ИД3 (дешифратор), 10 микросхем K155ЛН1 (инвертер), 26 датчиков температуры на основе микросхемы LM235Z. Коды управления с выходов платы Arduino поступают на информационные входы дешифраторов DD1, DD2, имеющие 4 информационных входа и 16 выходов, обеспечивая подключение одного из датчиков температуры ко входу инструментального усилителя. Каждый из двух дешифраторов управляет включением одного из 11 герконовых реле (коды управления 0001–1011) и плюс один резервный канал (код управления 1111). При нулевом коде управления (0000) ни один из датчиков температуры не подключается к измерительной схеме.

Вход дешифратора «ВК» – это вход «Выбора кристалла». При подаче на вход «ВК» сигнала логический «0» дешифратор осуществляет преобразование двоичного кода в унарный, т. е. вырабатывает сигнал логический «0» на одном из своих выходов в соответствии с кодом управления. При подаче на вход «ВК» логической «1» все выходы дешифратора переводятся в состояние логической «1», независимо от состояния кодов управления. Таким образом, если с вывода платы Arduino поступает сигнал логический «0», то активизируется дешифратор DD1, при этом дешифратор DD2 находится в пассивном состоянии, так как его вход «ВК» подключен к выходу платы Arduino через инвертор микросхемы K155ЛН1. Дешифратор DD2 будет активизирован при подаче логической «1» с выхода платы Arduino. Таким образом, дешифратор DD1 через герконовые реле K1–K11 подключает ко входу инструментального усилителя выходы датчиков температуры ДТ1–ДТ11. А дешифратор DD2 – через K13–K23 подключает ДТ13–ДТ23.

В настоящей работе предложена разработка информационно-измерительной системы контроля параметров медицинского одеяла на основе

анализа показаний температурных датчиков. Было выполнено макетирование коммутатора сигналов термодатчиков на беспаячных платах. Результаты макетирования подтвердили возможность коммутации сигналов датчиков температуры и их подключения ко входам инструментального усилителя. Обработка полученных данных с термодатчиков продемонстрировала работоспособность ключевых элементов системы, что показывает практическую реализуемость и функциональность предлагаемой системы.

Таким образом, предлагаемая разработка информационно-измерительной системы представляет собой вариант аппаратуры контроля параметров медицинского одеяла для лечения послеоперационных осложнений, связанных с гипотермией пациентов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках гранта Благотворительного фонда Владимира Потанина «#фондпотанина25».

Литература

1. Efficacy of forced-air warming systems with full body blankets / A. Bräuer [et al.] // Canadian journal of anaesthesia. – 2007. – № 54 (1). – С. 34–41.

УДК 621.383

ПРИБОРНЫЙ РЯД МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ

Гусев О. К., Воробей Р. И., Свистун А. И., Тьяловский А. К., Тьяловский К. Л., Шадурская Л. И.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Одним из способов решения задач оптической диагностики является использование фотоэлектрических сенсоров на основе полупроводников с собственной фотопроводимостью, слабо легированных глубокими примесями, формирующими несколько уровней с разными зарядовыми состояниями в запрещенной зоне. Особенности физических процессов перезарядки этих уровней позволяют создавать фотоприемники с различными функциональными возможностями на основе ряда простых приборных структур.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, мультипараметрический сенсор, приборная структура, глубокая примесь, преобразовательная характеристика, измерительный преобразователь.

SERIES OF MULTI-PARAMETRIC SENSORS

Gusev O., Vorobey R., Svistun A., Tyavlovsky A., Tyavlovsky K., Shadurskaya L.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. One of the ways to solve problems of optical diagnostics is to use photovoltaic converters based on semiconductors with intrinsic photoconductivity slightly doped with deep impurities, which form several energy levels with different charge states within the semiconductor's bandgap. Peculiarities of physical processes of recharging these levels make it possible to construct photodetectors with different functionality based on a range of simple device structures.

Key words: photovoltaic converter, multi-parametric sensor, device structure, deep impurity, conversion characteristic, measurement transducer.

*Адрес для переписки: Тьяловский К. Л., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by*

Функциональные и метрологические характеристики измерительной системы в основном определяются свойствами сенсоров, входящих в состав измерительных преобразователей системы. Отдельный тип сенсоров, характе-

ризующихся возможностью управления преобразовательными характеристиками и чувствительностью к нескольким входным факторам различной физической природы, представляют одноэлементные сенсорные структуры на основе

полупроводников с собственной фотопроводимостью, содержащих малую концентрацию многозарядной примеси [1, 2]. Управление их характеристиками удобно производить дополнительным оптическим излучением. Под действием управляющего оптического сигнала возможно переключение между поддиапазонами энергетической и спектральной характеристиками преобразования оптического излучения в ближнем и среднем ИК-диапазоне, включение чувствительности к дополнительным физическим факторам, например, к магнитному полю. Так как чувствительность сенсора к оптическому излучению определяется процессами рекомбинации, а каждое зарядовое состояние характеризуется отличающимися параметрами, то это позволяет создавать фотоприемники с различными функциональными возможностями на основе ряда простых приборных структур. Благодаря изменению свойств активной области сенсора вследствие особенностей свойств зарядовых состояний одного примесного центра, возможно управление характеристиками одноэлементного сенсора, чувствительного к входным факторам различной физической природы. Причем управление параметрами преобразовательных характеристик можно осуществлять в диапазоне энергетических характеристик до нескольких десятичных порядков, и спектральных характеристик от десятых долей до 6 мкм в области чувствительности от видимого до среднего ИК-диапазона преобразования [2]. Приборная структура таких сенсоров достаточна проста: от фоторезистивной до транзисторной (биполярной или полевой).

Уже простая фоторезистивная структура из-за последовательной перезарядки уровней с различными зарядовыми состояниями обеспечивает формирование энергетической характеристики чувствительности с несколькими поддиапазонами. Фоторезистивная структура с элетродами по четырем сторонам обеспечивает позиционную чувствительность к координатам светового пятна внутри светочувствительной области, а использование структуры с электродами на лицевой и тыльной сторонах сенсора обеспечивает реализацию функций оптического компаратора и детектора длины волны относительно некоторого значения [3].

Проявлением фоточувствительности сенсорной структуры полевого транзистора с каналом в полупроводнике с многозарядной примесью является смещение сток-затворной характеристики и изменение значения напряжения отсечки при изменении освещенности активной области. При этом дополнительной управляющей подсветкой можно изменять и вид спектральной характеристики чувствительности, переключая значение «красной» границы. Вывод затвора

может быть использован как управляющий электрод, так и как электрод-контакт с исследуемой жидкой средой (биологическим объектом), например, через иммерсионную жидкость [4].

Гальваномагнитный преобразователь образуется структурами биполярного транзистора с длинной базой или полевого МДП транзистора, в которых базовая область или канал выполнены из полупроводника с примесью, формирующей в запрещенной зоне несколько энергетических уровней для разных зарядовых состояний. Причем области с разными скоростями рекомбинации формируются в изначально однородной области полупроводника, только за счет изменения зарядовых состояний под действием освещения.

Отметим, что в ряде случаев конструкция сенсорной структуры требует применения «обратной засветки», которая для обеспечения высокой чувствительности реализуется путем утоньшения полупроводника под активной областью. Недостатки такой структуры могут быть устранены при размещении областей сенсорных структур и структур управляющих светодиодов, генерирующих управляющий сигнал, на сапфировой подложке, обеспечивающей хорошую совместимость с многими полупроводниковыми материалами [5]. Кроме того, сапфир обладает отличными оптическими свойствами в спектральном диапазоне от 0,2 до 6,0 мкм.

Таким образом, приборные структуры на базе полупроводников с низкой концентрацией глубокой примеси, формирующей в запрещенной зоне несколько энергетических уровней для разных зарядовых состояний, позволяют создавать фотоэлектрические преобразователи с большим динамическим диапазоном энергетических и спектральных характеристик. Ряд приборных структур одноэлементных сенсоров реализует чувствительность к нескольким входным факторам различной природы, таким как интенсивность и длина волны оптического излучения, координата светового пятна, величина электрического и магнитного поля, химический состав газовой или жидкой среды, контактирующей с затвором сенсора.

Выбор приборной структуры сенсора, материала полупроводника, типа глубокой примеси и ее концентрации позволяют создавать фотоприемники и измерительные преобразователи с заданными функциональными свойствами и характеристиками преобразования.

Конструкции и технологии мультипараметрических сенсоров на основе полупроводников с многозарядными примесями совместимы с «около кремниевыми» технологиями и технологиями «полупроводник на сапфире».

Измерительный преобразователь, с использованием нескольких, не менее двух, фотоэлект-

рических сенсоров с различающимися параметрами, реализует линейные характеристики преобразования в широком диапазоне и для нескольких входных факторов путем выбора и объединения перекрывающихся линейных участков характеристик преобразования разных фотоэлектрических сенсоров, входящих в состав преобразователя. При этом достигается увеличение динамического диапазона энергетической характеристики не менее, чем в два раза по логарифмической шкале интенсивности излучения, с соответствующим увеличением разрядности кода результата преобразования. Расширение спектральной характеристики чувствительности происходит на величину от десятых долей до шести мкм, в зависимости от материала основного полупроводника и многозарядной примеси.

УДК 681.586.48

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Дедович Н. Н., Романов А. Ф.

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

Аннотация. Представлены результаты оптимизации характеристик элементов пьезоэлектрического преобразователя для работы в газовой среде. С помощью моделирования методом конечных элементов получены значения собственных резонансных частот пьезоэлектрического преобразователя и требования к материалу согласующего слоя пьезопреобразователя.

Ключевые слова: ультразвук, пьезокерамический элемент, согласующий слой, метод конечных элементов.

OPTIMIZATION OF DESIGN ELEMENTS OF A PIEZOELECTRIC TRANSDUCER BY THE FINITE ELEMENT METHOD

Dedovich N., Romanov A.

*Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The results of optimization of characteristics of elements of piezoelectric transducer for operation in gas environment are presented. The values of natural resonance frequencies of piezoelectric transducer and requirements for material of matching layer of piezoelectric transducer are obtained by means of modeling by finite element method.

Key words: ultrasound, piezoceramic element, matching layer, finite element method.

*Адрес для переписки: Романов А. Ф., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: ramana@bsu.by*

Общая конструкция пьезоэлектрического преобразователя (ПП) для времяимпульсного метода измерений состоит из трех элементов: демпфер, пьезокерамический элемент (ПЭ) и согласующий слой [1].

Материал, тип и геометрия ПЭ определяются необходимостью получить направленный ПП с максимальной площадью взаимодействия со средой для повышения эффективности электроакустических преобразований. Для газовой среды, как правило, используют низкочастотные ультразвуковые волны, чтобы минимизировать потери при распространении ультразвуковых

Литература

1. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными состояниями / О. К. Гусев [и др.] под общ. ред. О.К. Гусева – Минск: БНТУ, 2010. – 582 с.
2. Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors with Intrinsic Photoconductivity / R. I. Vorobey [et al.] // Devices and Method of Measurements, – 2021, Nr 2. – P. 108–116
3. Многопараметрические измерительные преобразователи систем оптической диагностики на основе функциональных датчиков / Р. И. Воробей [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика – 2023, № 1. – С. 37–45.
4. Бурункова, Ю. Э. Сенсорные системы и материалы / Ю. Э. Бурункова, Е. О. Самуйлова. – СПб: Университет ИТМО, 2023. – 117 с.
5. Масол, И. В. Информационные нанотехнологии / И. В. Масол, В. И. Осинский, О. Т. Сергеев – Киев: изд-во Макрос, 2011. – 560 с.

волн в среде. Наиболее подходящим типом геометрии ПЭ является диск. Диапазон ультразвуковых частот от 100 кГц до 200 кГц соответствует радиальной моде колебаний диска. Для моделирования ПЭ выбран диск диаметром 14 мм с толщиной 2,1 мм [2].

Применение ПП в газообразной среде накладывает наиболее жесткие условия эксплуатации из-за большой разницы акустических сопротивлений среды и ПЭ. Для эффективного излучения и приема ультразвуковых волн требуется наличие согласующего слоя с промежуточным значением акустического импеданса.

Расчет и оптимизация согласующего слоя выполнен с помощью пакета программного обеспечения COMSOL Multiphysics [3] на основе двумерной осесимметричной модели с целью снижения вычислительных затрат (рисунок 1).

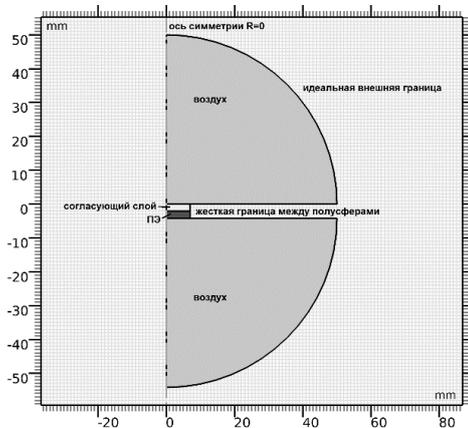


Рисунок 1 – Модель ПП

ПП расположен между двумя полусферами с воздухом при атмосферном давлении и комнатной температуре. На первом этапе выполнялась оценка уровня излучения ПЭ, а затем был добавлен согласующий слой и выполнена оптимизация характеристик материала слоя.

В результате поиска собственных резонансных частот получено значение резонансной частоты 143159 Гц, что дает хорошее соответствие результатам аналитических расчетов и измерениям образцов. На рисунке 2 представлены уровень излучения ПЭ без согласующего слоя и характеристика направленности излучения. ПЭ одинаково излучает в обе стороны и максимальное излучение на частоте соответствующей радиальной моде.

Геометрия согласующего слоя повторяет геометрию ПЭ. Характеристики материала рассчитаны из требований к значению акустического импеданса для согласующего слоя [4, 5].

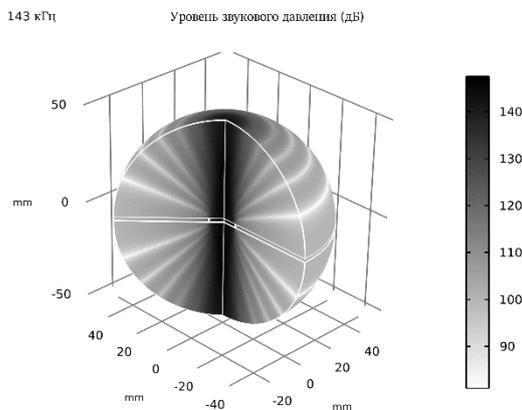


Рисунок 2 – Характеристика излучающей способности ПЭ

Применение согласующего слоя позволило увеличить энергию излучения со стороны согласования, но расчетные значения не являются оптимальными. Модуль оптимизации пакета COMSOL Multiphysics дает возможность решить задачу оптимизации плотности материала и модуля Юнга с требованием незначительного изменения удельного акустического сопротивления согласующего слоя. Уровень излучения ПП с оптимальным согласованием одной стороны ПЭ значительно повышается со стороны согласования ПЭ (рисунок 3).

59.357 кг/м³, 143 кГц Уровень звукового давления (дБ)

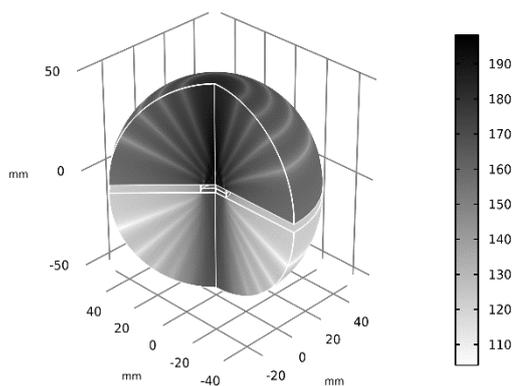


Рисунок 3 – Характеристика излучающей способности ПП после оптимизации согласующего слоя

Для сравнительных оценок характеристики излучения построены графики значений звукового давления на расстоянии 1 м от ПП по оси излучения в зависимости от частоты. На рисунке 4 собраны графики, иллюстрирующие результат повышения излучающей способности ПП благодаря согласованию ПЭ с рабочей средой и оптимизации характеристик согласующего слоя.

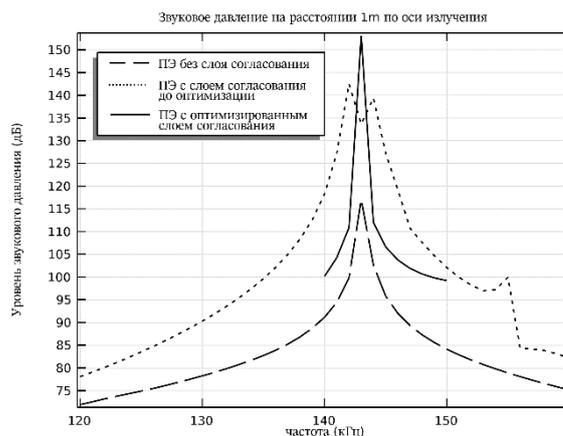


Рисунок 4 – Эволюция значения звукового давления на расстоянии 1 м

В результате были получены требования к материалу согласующего слоя. В качестве резуль-

тата можно отметить очень низкое значение плотности материала для согласующего слоя (около 60 кг/м^3). Из известных сегодня твердых материалов с низкой плотностью можно рассматривать пенопласт, пенополиуретан, пенополистирол. Возможным решением для снижения жестких требований к материалам является использование нескольких слоев согласования или получение активного элемента с низким акустическим сопротивлением путем использования композитных материалов. При этом описанный выше подход к расчету, моделированию и оптимизации конструктивных элементов позволяет сократить затраты при проектировании сложных устройств.

УДК 681.586.48

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Дедович Н. Н., Романов А. Ф.

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

Аннотация. Представлены результаты расчета элементов пьезоэлектрического преобразователя с учетом реальных условий эксплуатации в газовой среде. Моделирование пьезоэлектрического элемента методом конечных элементов показало хорошее совпадение с результатами натуральных измерений.

Ключевые слова: конструкция, пьезоэлектрический преобразователь, пьезокерамический элемент, метод конечных элементов.

MODELING OF STRUCTURAL ELEMENTS OF A PIEZOELECTRIC TRANSDUCER BY THE FINITE ELEMENT METHOD

Dedovich N., Romanov A.

*Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The results of calculation of piezoelectric transducer elements are presented taking into account real operating conditions in a gas environment. Modeling of a piezoelectric element by the finite element method showed good agreement with the results of natural measurements.

Key words: design, piezoelectric transducer, piezoceramic element, finite element method.

*Адрес для переписки: Романов А. Ф., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: ramanau@bsu.by*

Как правило пьезоэлектрические преобразователи (ПП) содержат пьезокерамический элемент (ПЭ), который обеспечивает обратимость преобразований и позволяет использовать преобразователь как в качестве излучателя, так и в качестве приемника ультразвуковых волн. Для эффективного излучения и приема ультразвуковых волн требуется наличие слоев с промежуточным значением акустического импеданса. В то же время на другой стороне ПЭ для устранения эффекта реверберации необходимо установить слой с акустическим импедансом близким к акустическому импедансу ПЭ (демпфер). Материал корпуса ПП должен обеспечить механическую и электромагнитную защиту многослойного преобразователя. Общая конструкция ПП показана на рисунке 1 [1].

Широкий диапазон избыточного давления (от 0,2 МПа до 2,5 МПа) и температур (от минус

Литература

1. Богуш, М. В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электроупругих моделей. М.: Техносфера, 2014. – 312 с.
2. APC International, Ltd. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.americanpiezo.com>. – Data of access: 2.12.2023.
3. COMSOL Multiphysics® version 6.1 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.comsol.com>. – Data of access: 11.09.2023.
4. Голямина, И. П. Ультразвук: Маленькая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
5. Исакович, М. А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. – 496 с.

50 °С до 100 °С) измеряемой среды приводит к тому, что наилучшее согласование обеспечивается только в ограниченной области диапазонов, так как расчетное значение акустического импеданса газа меняется в 10 раз (от $689 \text{ Па}\cdot\text{с/м}$ до $6560 \text{ Па}\cdot\text{с/м}$) [2, 3]. Следовательно, диапазон акустического импеданса согласующего слоя должен быть от $1,04\cdot 10^5 \text{ Па}\cdot\text{с/м}$ до $3,22\cdot 10^5 \text{ Па}\cdot\text{с/м}$ [4, 5].

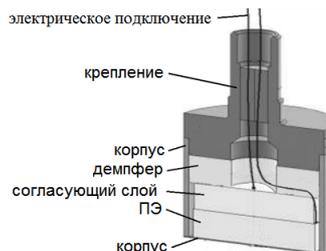


Рисунок 1 – Конструкция ультразвукового ПП

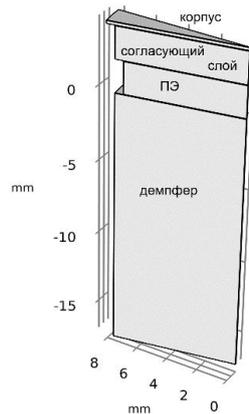


Рисунок 2 – Геометрия модели ПП

На первом этапе с помощью пакета программного обеспечения COMSOL Multiphysics [6] моделировался ПЭ и проводилась оценка ошибки моделирования. Для снижения вычислительных требований использована возможность построения симметричной 3D модели (рисунок 2). Кроме того, моделирование одиночного ПЭ проведено с дополнительной продольной симметрией, что привело к снижению количества элементов в 100 раз без потери качества сетки. Решение задачи поиска собственных частот выполнено в области низких частот (рисунок 3).

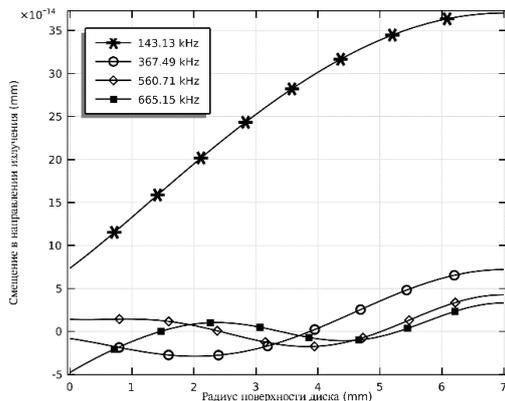


Рисунок 3 – Смещение поверхности ПЭ

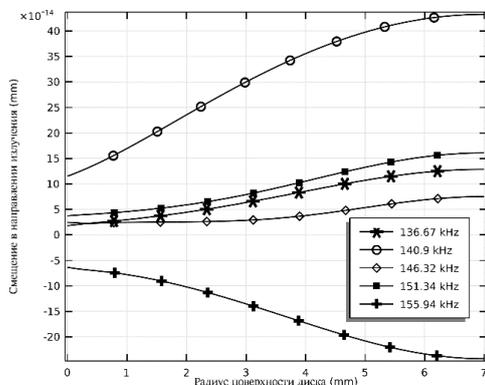


Рисунок 4 – Смещение поверхности ПЭ для полной конструкции ПП

Аналитический расчет резонансной частоты, соответствует радиальной моде колебаний 148571 Гц. Значение частоты резонанса в результате моделирования получилось равным 143129 Гц. Значение частоты резонанса по результатам измерений – 147399 Гц. Относительная ошибка моделирования составила 2,9 %.

Модель полной конструкции ПП содержит близко расположенные собственные частоты (рисунки 4 и 5). Дополнительные слои оказывают влияние на значение рабочей частоты ПП и амплитуду смещения поверхности ПЭ в направлении излучения.

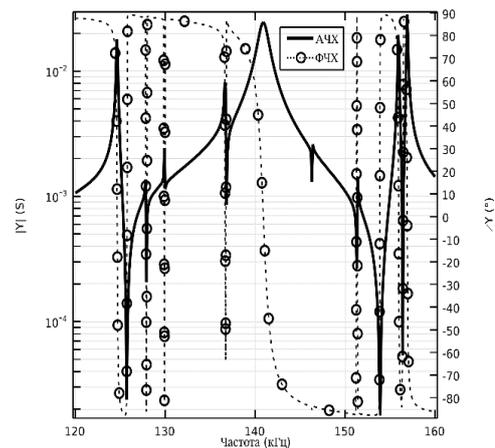


Рисунок 5 – Зависимость проводимости от частоты

Геометрические характеристики пьезоэлектрического элемента дополнительно к эффективности преобразований [7] определяют частотные свойства преобразователя и диаграмму направленности. Условия эксплуатации ультразвуковых преобразователей и импульсный метод измерений определяют конструктивные требования и решения. Применение ПП в газообразной среде накладывает наиболее жесткие условия эксплуатации из-за большой разницы акустических сопротивлений среды и ПЭ. Для повышения эффективности излучения ПП необходимо дополнительно проводить оптимизацию элементов конструкции. Оптимизация позволяет управлять значениями собственных частот и получать одночастотную гладкую амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) и фазо-частотную характеристику (ФЧХ). Процесс оптимизации сводится к коррекции свойств материалов и/или геометрических размеров слоев многослойного ПП.

Литература

1. Богуш, М. В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей. М.: Техносфера, 2014. – 312 с.
2. Газ природный. Методы расчета физических свойств, его компонентов и продуктов его переработки: ГОСТ 30319.1–2015. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 12 с.

3. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости. ГОСТ 30319.2–2015. – Москва: Стандартинформ, 2016.– 16 с.

4. Голямина, И. П. Ультразвук: Маленькая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.

5. Исакович, М. А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. – 496 с.

6. COMSOL Multiphysics® version 6.1 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.comsol.com>. – Data of access: 11.09.2023.

7. APC International, Ltd. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.americanpiezo.com>. – Data of access: 2.12.2023.

УДК 620.179.14

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФЕРРОЗОНДОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Добрыднев А. В., Безкоровайный В. С.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Луганский государственный университет имени Владимира Даля»
Луганск, Луганская Народная Республика*

Аннотация: Данная работа посвящена разработке и применению феррозондовых датчиков для мониторинга состояния железнодорожного транспорта. В работе подчеркивается необходимость повышения уровня безопасности транспортировки людей и грузооборота, снижение эксплуатационных затрат и повышение срока службы железнодорожной инфраструктуры.

Ключевые слова: Феррозондовый датчик, железнодорожный транспорт, мониторинг состояния.

THE USE OF FERROSONDES FOR MONITORING THE CONDITION OF RAILWAY TRANSPORT

Dobrydnev A., Beskorovayny V.

*Federal State Budgetary educational Institution of higher Education
«Lugansk State University named after Vladimir Dahl»
Lugansk, People's Republic of Lugansk*

Abstract: This work is devoted to the development and application of ferroconde sensors for monitoring the condition of railway transport. The paper emphasizes the need to improve the safety of transportation of people and cargo turnover, reduce operating costs and increase the service life of the railway infrastructure.

Keywords: Ferrosonde sensor, railway transport, condition monitoring.

Адрес для переписки: Добрыднев А. В., квартал Молодежный, 20А, г. Луганск291034, Луганская Народная Республика, e-mail: mushroomrace@yandex.ru

ЖД транспорт – это сектор экономического снабжения регионов, занимающийся перевозкой людей и различных грузов [1].

На долю ЖД транспорта приходится 80 % общего объема перевозок грузов и пассажиров, осуществляется наземным транспортом.

ЖД транспорт имеет множество преимуществ и с уверенностью можно сказать, что у него есть неоспоримые основания существовать и в будущем. Однако существует множество проблем, связанных с состоянием ЖД транспорта:

Износ и повреждение деталей – износ деталей до критических показателей отказа или нарушение сплошности слоя в результате трения, коррозионных разрушений, усталости материала и механической деформации конструкции (рисунок 1).

Отказ технических средств – частичное или полное разрушение объектов инфраструктуры, оборудования и нарушение технологических рекомендаций, ведущих к отказу технических средств.

Устаревшая инфраструктура – железнодорожные пути и станции нуждаются в модернизации. Старые и изношенные рельсы могут влиять на безопасность и скорость движения поездов (рисунок 2).



Рисунок 1 – повреждение критических деталей железнодорожного транспорта



Рисунок 2 – устаревшая инфраструктура

Безопасность – вопросы безопасности, как на уровне пассажирских перевозок, так и на уровне грузовых операций, остаются важной проблемой. Есть необходимость улучшения технологий управления движением и систем сигнализации.

Технологические изменения – внедрение новых технологий, таких как автоматизация и цифровизация, требует значительных инвестиций и подготовку кадров.

Проблемы с состоянием деталей железнодорожного транспорта могут повышать риск возникновения транспортных происшествий, крушений, аварий, что влечет за собой причинение вреда жизни и здоровью граждан (рисунок 3). Данные факторы поспособствовали к использованию феррозондового метода (ФМ) для мониторинга состояния железнодорожного транспорта неразрушающего контроля (НК) [2].



Рисунок 3 – железнодорожная катастрофа

Феррозондовый метод НК основан на регистрации параметров магнитного поля на поверхности намагниченного контролируемого изделия с помощью феррозондов (рисунок 3). Сопоставляя полученные данные исследуемого объекта с эталонным (бездефектная деталь), происходит процесс обнаружения несплошности поверхностного изделия. Феррозондовый метод можно реализовать с одним феррозондовым преобразователем, но сканирование поверхности объекта будет построчным, а с использованием феррозондовой матрицы расширяется возможность большего охвата поверхности детали [3].



Рисунок 3 – контроль деталей подвижного состава

Одноержневые феррозондовые преобразователи распространены в простых дефектоскопах, которые сканируют плоскость участка контролируемого объекта и преобразуют параметр магнитного поля в сигнал постоянного тока. Полученный сигнал сравнивается с базовыми значениями (с эталонным). Если сигнал превышает допустимое значение, то выдается результат об дефекте детали [3].

Достоинства метода:

- магнитные поля применяемые при контроле детали, глубоко проникающие в объект, позволяют обнаруживать поверхностные и подповерхностные несплошности глубиной до 40 мм;
- не зависит от качества поверхности (шероховатость литых деталей, сварочные швы);
- высокая чувствительность к усталостным трещинам (ширина трещины от 1 мкм и глубиной от 50 мкм).

Недостатки метода:

- жесткие требования к намагничиванию контролируемых объектов, что требует создание

намагничивающих устройств и соответствующего оборудования;

- специфичные настройки дефектоскопов, которые требуют специальные настроенные образцы с моделями дефектов. Каждая настройка параметров должна показывать малое отклонение от допустимого параметра.

Феррозондовые дефектоскопы позволяют проводить НК состояния не только транспорта, но и рельсовых путей, что существенно снижает риск аварий. Выявление дефектов на ранних стадиях, такие как трещины, коррозия или другие повреждения, дает возможность проводить своевременные ремонтные работы и предотвращать серьезные инциденты. Это особенно важно на участках с высокой интенсивностью движения, где даже малейшая неисправность может привести к катастрофическим последствиям [4].

Так же феррозондовые дефектоскопы позволяют оптимизировать процесс технического обслуживания, систематически отсележивая состояния рельс, что позволяет планировать работы по замене или ремонту инфраструктуры, а не по установленным графикам. Это приводит к экономии времени и средств, а также увеличивает общий срок службы железнодорожного полотна и других конструкций [5].

Вывод. Использование феррозондов для мониторинга состояния железнодорожного транспорта представляет собой перспективный и высокоэффективный метод. Феррозонды, как устройства, регистрирующие изменения магнитных свойств материалов, дают возможность осуществлять бесперебойный контроль за состоянием железнодорожного полотна, вагонов и других компонентов железнодорожной инфраструктуры. Их применение позволяет значительно повысить уровень безопасности и надежности перевозок.

Литература

1. Хлудеева, М. А. Железнодорожный транспорт и экономическое развитие // М. А. Хлудеева, Д. Д. Мясгутов. – Москва, 2023.
2. Ахмеджанов, Р. А. Феррозондовый контроль / Р. А. Ахмеджанов, В. С. Кашка, В. В. Макаровичкин, Н. В. Макаровичкина. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2007. – 47 с.
3. Шанаурин, А. М. Магнитоферрозондовый метод: состояние и эффективность применения на железнодорожном транспорте / А. М. Шанаурин, Г. И. Кравченко, Д. Г. Комлев. – Москва, 2020.
4. Техническая диагностика вагонов. В 2-х ч. : учеб. для ВУЗов ж.-д. трансп. / Р. А. Ахмеджанов [и др.]; ред. В. Ф. Криворудченко. Ч.2. Диагностирование узлов и деталей вагонов при изготовлении, ремонте и в условиях эксплуатации, 2013. – 315 с.
5. Труды XXV Всероссийской научно-практической Конференции. Инновационные технологии на железнодорожном транспорте. – Красноярск, 2021.

УДК 535.317; 535-34,548.732

ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ В РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПИНХОЛ-КАМЕРЫ И ОПТИКИ КУМАХОВА

Дудчик Ю. И., Балухо И. Н., Кольчевский Н. Н.

НИУ «Институт прикладной физическим проблем имени А. Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Предложен метод получения изображения объектов в рентгеновских лучах с использованием линзы Кумахова и цифровой рентгеновской пинхол-камеры. Линза используется для фокусировки рентгеновских лучей, пинхол-камера – для формирования и записи изображения объекта. Определены параметры линзы Кумахова, получены изображения тестового объекта в рентгеновских лучах.

Ключевые слова: рентгеновское излучение; рентгеновская линза Кумахова; рентгеновская пинхол-камера.

X-RAY IMAGING WITH PINHOLE CAMERA AND KUMAKHOV OPTICS

Dudchik Y., Balukho I., Kolchevsky N.

A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems BSU
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A method for obtaining images of objects in X-rays using a Kumakhov lens and a digital X-ray pinhole camera is proposed. A lens is used to focus X-rays, a pinhole camera is used to form and record an image of an object. The parameters of the Kumakhov lens were determined, and X-ray images of the test object were obtained.

Key words: X-rays, Kumakhov X-ray lens, pinhole X-ray camera.

Адрес для переписки: Дудчик Ю. И., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: dudchik@bsu.by

Просвечивание материалов и изделий рентгеновскими лучами широко используется в технической диагностике для определения структурных особенностей последних. Для регистрации пространственного распределения рентгеновского излучения используется фотопленка или цифровая 2-D камера. Для формирования рентгеновского пучка используются различные элементы рентгеновской оптики, например пинхолы, многоэлементные преломляющие рентгеновские линзы, зонные пластинки. Пинхол представляет собой экран с отверстием. В качестве материала экрана используется, например свинцовая фольга, диаметр отверстия может быть выбран из интервала от 5 мкм до, например, 200 мкм. Пинхол-камера используется для получения изображения источников рентгеновского излучения и, как объектив микроскопа, для получения флуоресцентного изображения объектов, как это показано, например, нами в [1, 2].

На рисунке 1 показано полученное изображение фокусного пятна рентгеновской трубки БСВ-24 с использованием пинхола диаметром 200 мкм и цифровой рентгеновской камеры. Изображение источника излучения регистрировалось с помощью рентгеновской камеры Photonic Science. Размер рабочей области рентгеновской камеры составляет 18×12 мм², число пикселей равно 4008×2670 . Размер пикселя камеры составляет 4,5 мкм. При съемке объекта использовалась функция биннинга, которая позволяет объединять несколько пикселей камеры в один. Расстояние от источника излучения до фокусного пятна рентгеновской трубки – 175 мм, расстояние от пинхола

до камеры – 175 мм. На рисунке 1 также нанесена измерительная сетка, которая позволяет определить размер источника излучения. Экспериментально определенный размер источника излучения совпадает с паспортными данными рентгеновской трубки.

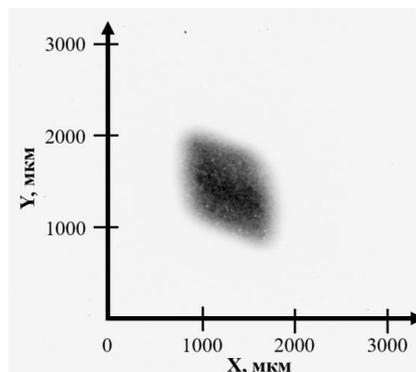


Рисунок 1 – Изображение фокусного пятна рентгеновской трубки и нанесенная измерительная сетка

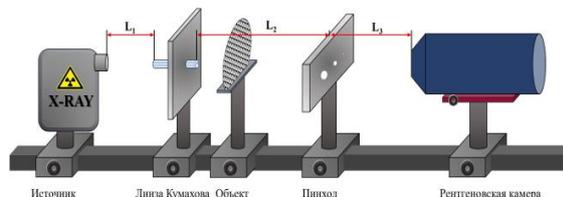


Рисунок 2 – Рентгеновский микроскоп с линзой Кумахова и пинхол-камерой

Для получения изображений объектов в рентгеновских лучах с использованием пинхол-ка-

меры и оптики Кумахова была реализована рентгенооптическая система, схема которой показана на рисунке 2.

Система содержит источник рентгеновских лучей, линзу Кумахова, пинхол и цифровую рентгеновскую камеру. Линза Кумахова использовалась для формирования сходящегося рентгеновского пучка. Линза содержит большое число стеклянных изогнутых микрокапилляров диаметром около 5 мкм. Выходная апертура линзы – 5,65 мм, входная – 3,5 мм. На рисунке 3 показана измеренная зависимость диаметра пучка рентгеновского излучения, сформированного линзой Кумахова, от расстояния между линзой и рентгеновской камерой. Диаметр пучка измерялся путем анализа изображения пятна, зафиксированного камерой.

Видно, что диаметр рентгеновского пучка уменьшается с ростом расстояния от линзы. Расстояние, где диаметр сфокусированного пучка минимальный, принимается за фокусное расстояние линзы Кумахова. Фокусное расстояние использованной линзы Кумахова для 8 кэВ фотонов (энергии характеристических фотон атомов меди-материала анода рентгеновской трубки) составляет 175 мм, диаметр рентгеновского пучка в фокусе линзы – 1,5 мм. Эксперимент проводился при следующих параметрах рентгеновской трубки: напряжение $U = 22$ кВ, ток $I = 8$ мА. Для рентгеновской камеры Photonics Science были заданы следующие параметры съемки: время экспозиции – 20 с, биннинг 2.

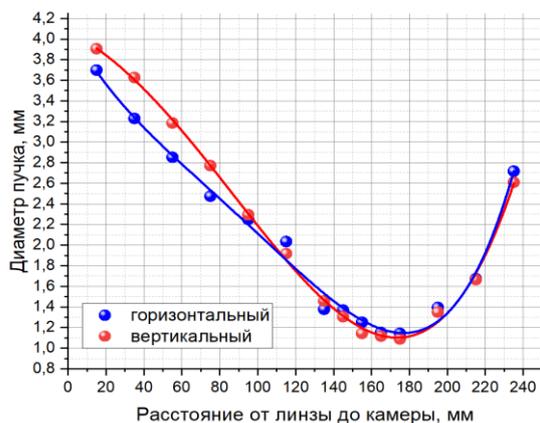


Рисунок 3 – Измеренная зависимость диаметра пучка рентгеновского излучения от расстояния между линзой Кумахова и рентгеновской камерой

Собрана и отъюстирована рентгенооптическая система, состоящая из рентгеновского источника, линзы Кумахова, пинхола и детектора Photonics Science. Расстояние от источника до линзы $L_1 = 152$ мм, расстояние от линзы до пинхола $L_2 = 175$ мм, расстояние от пинхола до детектора $L_3 = 175$ мм. Параметры рентгеновской трубки: $U = 22$ кВ, $I = 2$ мА, режим работы рентгеновской камеры: экспозиция 15 с, биннинг 2. Полученное

изображение рентгеновского источника в схеме экспериментальной установки с линзой Кумахова и пинхол-камерой показано на рисунке 4.

В качестве объекта исследования выбрана металлическая сетка с круглыми отверстиями, которая располагалась вплотную за линзой Кумахова (рисунок 2), диаметр отверстия в сетке равен 0,352 мм. Расстояние от пинхола до камеры $L_3 = 175$ мм. Параметры режима работы рентгеновской трубки: $U = 22$ кВ, $I = 8$ мА, режим работы рентгеновской камеры: экспозиция 30 сек, биннинг 4. Полученное экспериментальное изображение сетки приведено на рисунке 5.

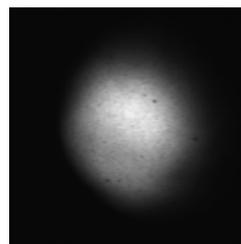


Рисунок 4 – Изображение рентгеновского пучка для системы с линзой Кумахова и пинхол-камерой

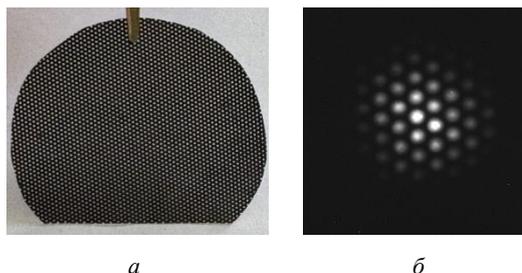


Рисунок 5 – Видимое изображение сетки (a) и рентгеновское изображение сетки (b) сформированное пинхол-камерой

Таким образом, проведенные исследования впервые показали возможность использования оптики Кумахова и пинхол-камеры для получения изображения объектов в рентгеновских лучах.

Благодарности. Работа частично поддержана Министерством образования Республики Беларусь в рамках задания 3.12 ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», подпрограмма «Техническая диагностика».

Литература

1. Дудчик Ю. И. Получение изображения источника рентгеновского излучения с использованием пинхол камеры [Текст] / Ю.И. Дудчик, И.Ю. Звягин // Приборостроение -2013: материалы 6-ой Межд. научно-техн. конференции БНТУ. – Минск, 2013. – С. 290 – 292.
2. Дудчик, Ю. И. Получение изображения объектов во вторичных рентгеновских лучах с использованием пинхол камеры / Ю. И. Дудчик, Г. И. Хилько, Ю. К. Ломашко // Приборы и методы измерений: научно-технический журнал. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 169–175.

УДК 621.9.015, 620.184

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ И СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ

Жарин А. Л.¹, Тявловский А. К.¹, Пантелеев К. В.¹, Свистун А. И.¹, Микитевич В. А.¹,
Воробей Р. И.¹, Гусев О. К.¹, Борисенок С. В.¹, Самарина А. В.¹, Мухуров Н. И.²

¹Белорусский национальный технический университет
²ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Для исследования дефектности поверхности анодного оксида алюминия применен комплексный подход, включающий анализ пространственного распределения относительных значений работы выхода электрона и поверхностной фото-ЭДС методом сканирующего зонда Кельвина и подробное изучение дефектных областей методом оптической микроскопии. Сканирование поверхности образца электрометрическим зондом с низким пространственным разрешением обеспечивает быстрое предварительное выявление и локализацию областей скопления дефектов, тогда как оптическая микроскопия позволила определить конкретный вид выявленных дефектов.

Ключевые слова: анодный оксид алюминия; работа выхода электрона; сканирующий зонд Кельвина; структурный дефект; оптическая микроскопия.

STUDY OF ANODE ALUMINUM OXIDE DEFECTS WITH OPTICAL MICROSCOPY AND SCANNING PROBE ELECTROMETRY TECHNIQUES

Zharin A.¹, Tyavlovsky A.¹, Pansialeyeu K.¹, Svistun A.¹, Mikitsevich U.¹,
Vorobey R.¹, Gusev O.¹, Borisyonok S.¹, Samaryna A.¹, Mukhurov N.²

¹Belarusian National Technical University
²SSPA "Optics, Optoelectronics, and Laser Technology"
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The study of the anodic aluminum oxide surface defectiveness was performed with a comprehensive approach that included an analysis of the spatial distribution of the relative surface work function and surface photo-EMF using the scanning Kelvin probe combined with a detailed study of the defective areas with optical microscopy. Low-resolution scanning of the sample's surface with an electrometric probe ensures rapid preliminary detection and localization of defective areas while optical microscopy made it possible to determine the specific type of defects found.

Key words: anode Aluminum oxide; work function; scanning Kelvin probe; structural defect; optical microscopy.

Адрес для переписки: Тявловский А. К., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

Сложность анализа дефектов анодного оксида алюминия связана с малыми характерными размерами возможных дефектов, в ряде случаев, имеющих поперечный размер менее длины волны видимого оптического излучения, что делает их недоступными прямому наблюдению методами оптической микроскопии. Структура поверхности анодного оксида алюминия и ее дефекты может быть эффективно визуализирована методами атомно-силовой микроскопии (АСМ), однако АСМ характеризуется крайне малыми размерами поля зрения (порядка единиц микрометров), что делает практически невозможным полное исследование поверхностей макроскопических размеров (десятки миллиметров), а также не позволяет локализовать расположение выявленных дефектов в пределах макроскопической поверхности. В то же время, для характеристик конечного изделия значение имеет не столько факт наличия дефектов и их конкретный вид, сколько средняя концентрация дефектов в некоторой области и их

пространственное распределение в пределах рабочей поверхности образца.

Решение данной задачи может быть обеспечено комплексным применением нескольких методов исследования. В настоящей работе первичный анализ поверхности для выявления областей с повышенной концентрацией дефектов пористости анодного оксида алюминия выполнялся методом сканирующей зондовой электрометрии (сканирующего зонда Кельвина, SKP) [1]. Данный метод обладает исключительно высокой чувствительностью к любым изменениям работы выхода электрона (РВЭ) с исследуемой поверхности, причем для сканирующего зонда Кельвина характерно усреднение значений РВЭ под площадью чувствительного элемента зонда. Таким образом, измерительный сигнал оказывается пропорционален концентрации дефектов в пределах данной площади и их выраженности, понимаемой как степень отличия РВЭ дефектов от РВЭ бездефектной поверхности. При этом сами значения

РВЭ оцениваются косвенно, как относительные величины, по значению непосредственно регистрируемой зондом контактной разности потенциалов (КРП), характеризующей разность значений РВЭ чувствительного элемента зонда Кельвина и участка поверхности. Пространственное разрешение использованного в исследованиях зонда Кельвина составляло порядка 0,5 мм, что исключало разрешение отдельных дефектов, однако обеспечивало малое время полного сканирования поверхности и позволяло локализовать области наибольшей концентрации дефектов, подлежащие более подробному изучению. Дополнительное воздействие оптическим излучением (интенсивное освещение поверхности) в процессе сканирования с регистрацией возникающей при этом внутренней фото-ЭДС позволяло разделить вклад в измерительный сигнал сканирующего зонда Кельвина собственно отклонений РВЭ, характеризующих структурный дефект, и электрического потенциала, создаваемого адсорбированным зарядом на поверхности образца [2].

На втором этапе области поверхности, демонстрирующие отклонения значений РВЭ (или КРП) от среднего для образца, более подробно исследовались с помощью оптического микроскопа с последовательно изменявшимся увеличением от $\times 10$ до $\times 100$. Это позволило более точно локализовать дефекты и определить их характер.

На рисунке 1 приведен микроснимок скола одного из исследованных образцов, представлявшего собой фотонный кристалл анодного оксида алюминия, сформированный периодическим изменением плотности электрического тока анодирования $0,4 \text{ mA/cm}^2$ и $1,8 \text{ mA/cm}^2$ в электролите 1,0 М серная кислота с добавкой этиленгликоля (50 % об.).

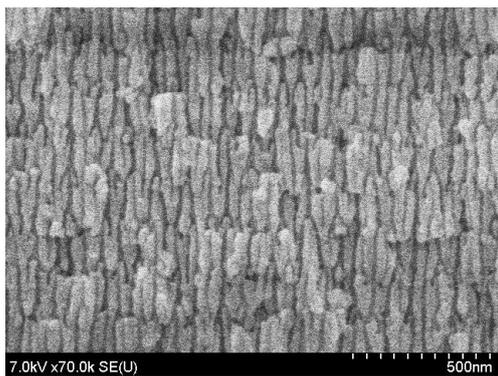


Рисунок 1 – Микроснимок скола исследованного образца фотонного кристалла анодного оксида алюминия

Размеры поверхности образца для исследованной составляли 10×10 мм. Зарегистрированное сканирующим зондом Кельвина распределение КРП поверхности образца (рисунок 2, а) демонстрирует две резко отличающиеся по электрофизи-

ческим свойствам области. В пределах $\frac{3}{4}$ поверхности образца средние значения КРП составляют приблизительно 380 мВ, тогда как в пределах $\frac{1}{4}$ (левый верхний квадрант) среднее значение КРП составляет -280 мВ. В этой же области имеют место высокие значения поверхностной фото-ЭДС, достигающие 300 мВ (рисунок 2, б). На основной части поверхности, характеризующейся положительными значениями КРП 380 мВ, поверхностная фото-ЭДС близка к нулю. В совокупности это позволяет предположить, что в левом верхнем квадранте образца имеет место высокая концентрация дефектов, обеспечивающих возможность миграции поверхностного электрического заряда под воздействием оптического излучения.

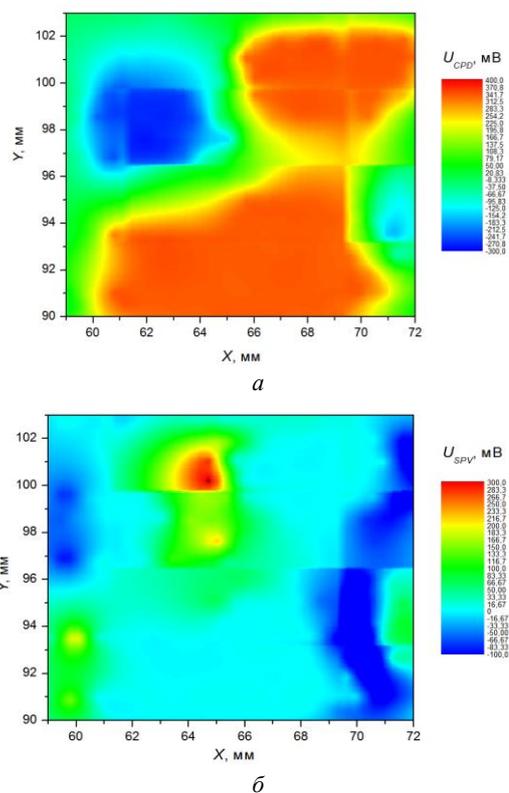


Рисунок 2 – Распределение КРП (а) и поверхностной фото-ЭДС (б) поверхности образца в целом

Один из локализованных в данной области дефектов в виде микроскопического включения, явившегося центром формирования кольцевых структур в анодном оксиде алюминия, хорошо просматривается на оптическом изображении с увеличением $\times 10$ (рисунок 3, а). Дополнительное увеличение до $\times 40$ (рисунок 3, б) и $\times 100$ (рисунок 3, в) в пределах той же области позволило выявить более мелкие дефекты, однако информация о более крупных структурных нарушениях с характерными размерами, превышающими поле зрения микроскопа, при этом становится недоступной.

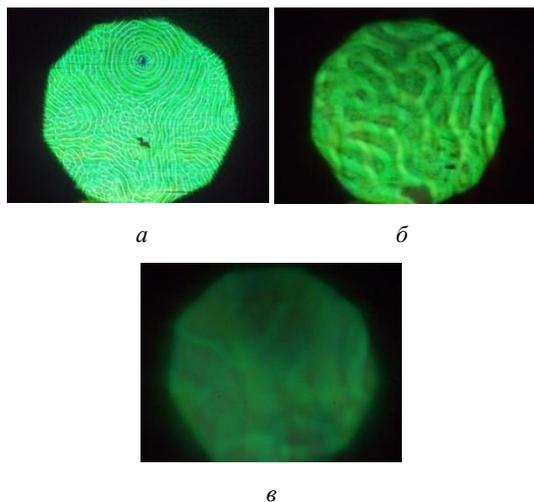


Рисунок 3 – Оптическое изображение дефектной области с увеличением $\times 10$ (а), $\times 40$ (б) и $\times 100$ (в)

Результаты исследований показали, что исследование поверхности анодного оксида алюминия методом сканирующего зонда Кельвина позво-

ляет эффективно выявлять и локализовать области концентрации структурных дефектов, при этом регистрируемые зондом значения КРП могут использоваться как условная количественная характеристика степени дефектности участка поверхности. Для уточнения вида дефектов могут использоваться дополняющие методы, такие как оптическая или атомно-силовая микроскопия, обеспечивающие более высокое пространственное разрешение, но малое (недостаточное для начальной локализации дефектов) поле контроля.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания 1.10 ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций».

Литература

1. Zharin, A. L. Contact Potential Difference Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping // Applied Scanning Probe Methods. – 2010. – V. 14. – P. 687–720.
2. Растровая сканирующая фотостимулированная электрометрия для контроля прецизионных поверхностей / Р. И. Воробей [и др.] / Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 10. – С. 66–73.

УДК 621.391

ТЕСТИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ УЯЗВИМОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Завадская Т. Е.

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

Аннотация. Показаны критичность волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) к несанкционированному доступу (НСД), который может осуществляться неинтрузивными способами. Показана примерная соответствующей лабораторной установки.

Ключевые слова: волоконно-оптическая линия связи, несанкционированный доступ, уязвимость линии, требования безопасности.

TESTING THE INFORMATION VULNERABILITY OF FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINES

Zavadskaya T.

*Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russian Federation*

Abstract. The criticality of a fiber-optic communication line (fiber optic line) to unauthorized access (NSD), which can be carried out in non-intrusive ways, is shown. An approximate model of the corresponding laboratory installation is shown.

Key words: fiber-optic communication line, unauthorized access, vulnerability of the line, security requirements.

*Адрес для переписки: Завадская Т. Е., ул. Вторая Бауманская, 5, г. Москва 107005, Российская Федерация
e-mail: zavadskaya@bmstu.net*

Почти все преимущества ВОЛС не вызывают сомнений, но тезис о хорошей защищенности волоконно-оптической линии связи от несанкционированного доступа (НСД) требует разъяснений. Определимся, что применительно к ВОЛС это означает невозможность перехвата информации без физического нарушения целостности волоконно-оптической линии и отсутствие паразитных наводок [1].

В Центре компетенций компании «Открытые технологии» был собран стенд для исследования возможной уязвимости ВОЛС, представляющий

собой модель распределенного центра обработки данных. Оптическая магистраль имитировалась кросс-панелью с петлей из разделанного многожильного оптического кабеля для внешней проводки. В качестве перехватчика использовалось пассивное устройство типа «ответвитель-прищепка» FOD 5503. Такое устройство создает микроизгиб в волокне и ответвляет сигнал, который может быть получен через имеющийся патч-корд. В процессе тестирования удалось перехватить сигнал, передаваемый в одном направлении.

Следует отметить, что описанные действия можно выполнить без применения специализированного дорогостоящего инструмента (приемлемая стоимость средств перехвата позволяет их использовать не только организациям, но и частным лицам) и за сравнительно небольшое время. Линии связи остались без разрывов: в процессе подготовки стенда кабель был освобожден лишь от внешних защитных оболочек, а волокна находились в защитном цветном буфере толщиной 250 мкм [2].

Из результатов эксперимента следует такой вывод: уязвимость ВОЛС доказана на практике. А потому в связи с возможностью компрометации передаваемых данных или их модификации необходимо использовать средства криптографической защиты информации, передаваемой по ВОЛС. Для криптографической защиты следует выбрать средства, которые не вносят существенных временных задержек при криптографическом преобразовании передаваемой/принимаемой информации и обеспечивают шифрование/расшифровку для всего диапазона скоростей передачи данных, характерного для каналов SONET/SDH [3].



Рисунок 1 – Схема испытательного стенда

В качестве таких средств были выбраны устройства SafeEnterprise SONET Encryptor компании SafeNet. Они осуществляют шифрование всего трафика SDH на канальном уровне на скорости от OC-3 (155,5 Мбит/с) до OC-48 (2,4 Гбит/с). Их применение прозрачно для протоколов вышележащих уровней и, следовательно, не должно вносить существенной задержки в сигнал. Это предположение было решено проверить серией тестов [4].

Для проведения новой серии испытаний был собран стенд, имитирующий нагрузку на магистраль передачи данных между основным ЦОД и резервным. Оборудование шифрования трафика SafeEnterprise SONET Encryptor OC3/OC12 подключалось к магистрали SDH и обеспечивало прозрачное для конечных устройств шифрование трафика. Для тестирования использовались встроенные средства OS Sun Solaris, которые создавали нагрузку на дисковую подсистему и из-

меряли ее параметры. Параметры нагрузки варьировались как по видам нагрузки, так и размерам блока передаваемых данных (8 Кбайт и 1 Мбайт). Измерения последовательно проводились для двух конфигураций испытательного стенда: канал 100 Мбит/с с шифрованием и канал с той же пропускной способностью без шифрования [5].

Исходя из проведенных исследований можно сформировать краткую информацию по требованиям безопасности, предъявляемой к информации, передаваемой по ВОЛС, представленной в таблице 1.

Таблица 1 – Требования безопасности, предъявляемые к информации, передаваемой по ВОЛС, и методы защиты

Требование безопасности	Методы защиты, выполняющие требование безопасности
Обеспечение контроля штатных параметров сигнала с информацией, передаваемой по ВОЛС	Мониторинг при помощи рефлектометров, дальнометров, интерферометров, специальных автоматизированных систем мониторинга
Обеспечение безопасности оптоволоконного канала в местах механических соединениях оптоволоконна	Введение дополнительного шумления, маскирования и кодирования проходящего сигнала, введение дополнительных внешних методов защиты оптоволоконна
Обеспечение безопасности оптоволоконного канала от внешней среды и механических воздействий	Использование специальных покрытий, усиленного бронирования к применяемому оптоволокону
Обеспечение безопасности оптоволоконного канала от внешнего излучения	Использование специальных покрытий, усиленного бронирования к применяемому оптоволокону
Обеспечение безопасности оптоволоконного канала от внешнего излучения	Использование специальных покрытий, усиленного бронирования к применяемому оптоволокону
Обеспечение безопасности информации, передаваемой по оптоволоконному каналу, на протяженных участках прокладки оптоволоконна	Использование специальных покрытий, усиленного бронирования к применяемому оптоволокону, введение кодирования и мониторинга на концах участков

Полученные данные позволяют сформулировать основную информацию о текущей ситуации в сфере обеспечения информационной безопасности ВОЛС и разработать на их основе математическую постановку задачи и алгоритм программного обеспечения.

Литература

1. Optical Network Security: Technical Analysis of Fiber Tapping Mechanisms and Methods for detection and Prevention, Keith Shaneman & Dr. Stuart Gray, IEEE Military Communications Conference, 2004.
2. Широкополосные телекоммуникационные средства с кодовым разделением каналов на основе хаотических сигналов / Ю. В. Гуляев и др. // Радиотехника. – 2014. – № 10. – С.3–15.

3. Документация SafeNet SONENT Encryptor [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.askon.cz/downloadFile.php?ID=23>.

4. Румянцев, К. Е. Защита сообщений в фотонных телекоммуникационных системах – новая технология передачи данных / К. Е. Румянцев, И. Е. Хайров // Сборник докладов и статей регионального научно-практического семинара «Информационная безопасность Юг России». – Таганрог, 2003.

5. Fietcher, P. Light pulses sent over optical fibers create «Invulnerable» encryption / P. Fietcher // Electron Des. – 1995. – V. 43, – № 26. – P. 38–40.

6. Румянцев, К. Е. Передача конфиденциальной сообщений по волоконно-оптическим линиям связи, защищенная от НСД / К. Е. Румянцев, И. Е. Хайров // Информационное противодействие угрозам терроризма. – 2003. – № 1.

УДК 621.3.049.77: 681.586

ЦИФРОВОЙ ЛАЗЕРНЫЙ ДАЛЬНОМЕР С РАДИОИНТЕРФЕЙСОМ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ Здоровцев С. В., Кушнеров Д. П., Шевченко А. В.

Открытое акционерное общество «МНИПИ»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены результаты разработки цифрового лазерного дальномера для определения положения (измерения расстояния) объекта. Прибор обеспечивает беспроводную передачу данных на удаленный ПК по радиоканалу за счет встроенного радиоинтерфейса.

Ключевые слова: цифровой лазерный дальномер, определение положения объекта, беспроводная передача данных.

DIGITAL LASER RANGEFINDER WITH A RADIO DATA TRANSMISSION INTERFACE Zdorovtsev S., Kushnerov D., Shevchenko A.

MNIPI Open Joint-Stock Company
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The results of the development of a digital laser rangefinder for determining the position (distance measurement) of an object are presented. The device allows wireless data transmission to a remote PC via a radio channel by means of the built-in radio interface.

Key words: digital laser rangefinder, determining the object position, wireless data transmission

Адрес для переписки: Здоровцев С. В., ул. Я. Коласа, 73, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: zgk@mniipi.by

Оптические приборы являются самой распространенной группой приборов для измерения положения и перемещения объектов. Оптические приборы позволяют выполнять бесконтактное измерение, определять положение объектов, перемещающихся с большой скоростью. Расстояние обнаружения может достигать сотен метров, а точность определения положения объекта достигать десятых долей микрона.

В настоящее время широкое распространение получили лазерные дальномеры для измерения расстояния и положения объектов, а также различные системы контроля и обеспечения безопасности на основе лазерных датчиков [1–3].

В работе представлены результаты разработки цифрового лазерного дальномера, предназначенного для измерения положения объекта с возможностью беспроводной передачи данных за счет использования встроенного радиоинтерфейса.

Структурная схема дальномера представлена на рисунке 1.

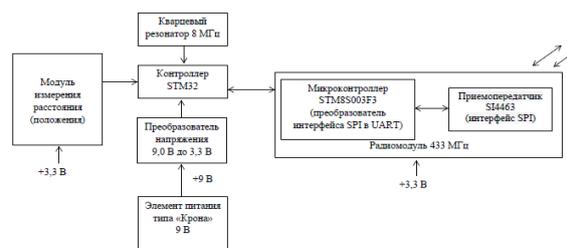


Рисунок 1 – Структурная схема цифрового лазерного дальномера

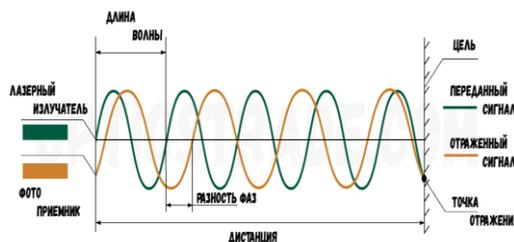


Рисунок 2 – Принцип работы лазерного дальномера

В качестве датчика положения (расстояния) использован лазерный модуль М701А, принцип работы которого основан на измерении разности фаз передаваемой и отраженной волны, на основе которой рассчитывается дистанция (рисунок 2).

Основные параметры лазерного модуля М701А, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры модуля параметрического контроля.

Параметр	Значение
Диапазон измерения, м	от 0,03 до 100
Точность измерения, мм	±3,0
Время измерения, с	от 0,125 до 4,0
Длина волны лазера, нм	635
Мощность излучения лазера, мВт	до 1,0
Класс лазера	II
Электрический уровень	TTL/CMOS
Рабочая температура, град.С	от 0 до + 40

На рисунке 3 показан разработанный прибор, состоящий из блока лазерного измерителя (БЛИ) и блока регистрации данных (БРД).



Рисунок 3 – Цифровой лазерный дальномер

Обработка измерительной информации осуществляется микроконтроллером STM32F103C8T6 с процессором Cortex-M3 [1], к которому подключается БЛИ по шине I2C. Шина I2C является одной из модификаций последовательных протоколов обмена данными, подробное описание которой представлено в [2].

Для беспроводной передачи измерительной информации на удаленный ПК в БРД введен модуль приемопередатчика HC-12 на базе микросхемы SI4463. Для увеличения дальности приема-передачи данных использована внешняя антенна ANT 433 ESG-433-01 R/A SMA-M / 433МГц, 1dBi, угловая.

Прием измерительной информации осуществляется с помощью блока радиомодема (рисунок 4), включающего модуль приемопередатчика HC-12 и конвертер USB-TTL на базе микросхемы SILABS CP2102 DCL00X 1612, что дает возможность передачи измерительной информации на ПК за счет преобразования интерфейса UART в USB.

Текущая измерительная информация, регистрируемая дальномером, отображается на экране

ПК в виде цифровых значений и в виде графика изменения измеренных значений со временем. Полученные данные могут сохраняться в архиве для проведения последующего анализа событий.



Рисунок 4 – Блок радиомодема

На рисунке 5 представлено информационное окно ПК при сборе данных с дальномера.

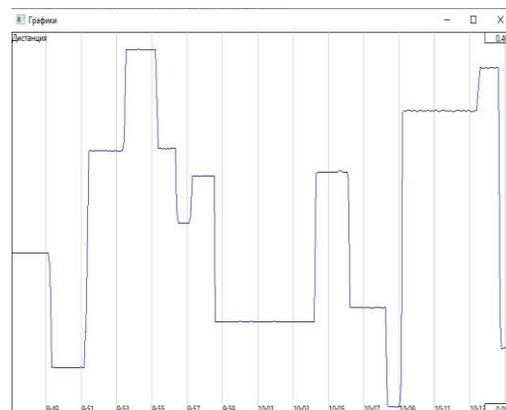


Рисунок 5 – Информационные окна ПК при сборе данных с дальномера

Разработанный цифровой лазерный дальномер может быть использован для контроля положения объектов в удаленных труднодоступных местах за счет беспроводной передачи данных по радиоканалу. Кроме того, в последнее время широкое распространение получили лазерные сканеры, предназначенные для бесконтактного измерения и контроля профиля поверхности, положения, перемещения, размеров, распознавания технологических объектов, построения 3D моделей. В ряде случаев такие устройства устанавливаются на подвижные платформы и должны быть полностью автономными, в том числе обеспечивать беспроводную передачу измерительной информации. Важным направлением использования бесконтактных сканирующих систем является обеспечение зон безопасности технологических линий и объектов различного назначения.

Литература

1. Лазерные датчики расстояния [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://geoportal.by/katalog/las>.
2. Лазерные датчики положения и измерения расстояния [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://t-automation.by/senso>.
3. Лазерные сканеры безопасности [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://sensorica.by/catalog/pr>.

УДК 615.835.3

АППАРАТУРА КОНТРОЛЯ И ВЫВЕДЕНИЯ АЛКОГОЛЯ ИЗ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ДЫХАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Зельманский О. Б., Богуш В. А.

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

Аннотация. Предложены технические системы, предназначенные для терапии синдрома дыхательной недостаточности и алкогольного абстинентного синдрома, а также контроля содержания алкоголя в крови персонала мобильных и стационарных объектов и блокирования доступа к аппаратно-программным средствам управления этими объектами, построенные на основе анализа показателей функции внешнего дыхания человека, включая пульс, сатурацию, частоту дыхания, а также концентрацию алкоголя в глубоком альвеолярном выдыхаемом воздухе. Обосновано применение алгоритма шифрования Twofish с целью обеспечения конфиденциальности и целостности информации, обрабатываемой и передаваемой предложенными системами в формате HL7-сообщений.

Ключевые слова: синдром отмены алкоголя, нормоксическая лечебная компрессия, содержание алкоголя в крови, анализ выдыхаемого воздуха на содержание алкоголя, контроль доступа.

APPARATUS FOR CONTROL AND ELIMINATION OF ALCOHOL FROM THE HUMAN ORGANISM BASED ON THE RESPIRATORY SYSTEM MODEL

Zelmanski O., Bogush V.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The technical systems intended for the treatment of respiratory failure syndrome and alcohol withdrawal syndrome as well as monitoring the blood alcohol content of personnel of mobile and stationary objects and blocking access to hardware and software for controlling these objects are proposed. They are built on the basis of the analysis of human external respiration function indicators including pulse, saturation, respiratory rate, and alcohol concentration in deep alveolar exhaled air. The use of the Twofish encryption algorithm is substantiated in order to ensure the confidentiality and integrity of information processed and transmitted by the proposed systems in the HL7 message format.

Key words: alcohol withdrawal syndrome, normoxic therapeutic compression, blood alcohol content, breath alcohol analysis, access control.

*Адрес для переписки: Зельманский О. Б., ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: 7650772@rambler.ru*

Управление транспортными средствами, сложным технологическим оборудованием, а также критически важными объектами информатизации, в том числе для обеспечения функционирования экологически опасных или социально значимых производств, является неотъемлемой частью жизни современного человека. В связи с чем нахождение в состоянии алкогольного опьянения при управлении такими источниками повышенной опасности остается одной из актуальных угроз как безопасности, так и здоровью человека [1]. Одним из подходов к решению обозначенной задачи является оценка физического состояния персонала (пульс, сатурация, частота дыхания, концентрация алкоголя в выдыхаемом воздухе), работающего с источниками повышенной опасности. Кроме того, алкогольной зависимостью обуславливается до 30 % затрат системы здравоохранения, поскольку с ней, как правило, связаны сопутствующие заболевания, влияющие на рост смертности [2]. Исходя из чего, очевидна необходимость в технических системах, обеспечивающих повышение эффективности лечения алкогольной интоксикации и алкогольного абстинентного синдрома, и в то же время сокращение фар-

макологической нагрузки на организм пациента, а также сокращение затрат.

Предлагаются система контроля содержания алкоголя в крови персонала мобильных и стационарных объектов [3], а также портативная система оксигенации под избыточным давлением [4]. В основу данных систем была положена модель дыхательной системы человека. Во-первых, это обусловлено тем, что благодаря низкой молекулярной массе, хорошей растворимости в воде и относительной растворимости в жире при употреблении алкоголь быстро проникает в стенки желудка и всасывается в кровь, а оттуда – в выдыхаемый воздух при испарении из легочной артериальной крови в процессе газообмена. Соответственно, установить факт нахождения человека в состоянии алкогольного опьянения возможно путем определения концентрации алкоголя в глубоком альвеолярном выдыхаемом воздухе. Во-вторых, алкоголь нарушает связывание и транспорт кислорода гемоглобином, вызывая гипоксию, достигающую наибольшей выраженности во время острой интоксикации и абстинентного синдрома. В связи с чем возможно добавление кислородной терапии к комплексному лечению, а для его контроля – измерение пульса, сатурации и частоты дыхания.

Таким образом, с целью выявления факта нахождения человека в состоянии алкогольного опьянения, с одной стороны, и для подбора и коррекции режима кислородной терапии при острой алкогольной интоксикации и абстинентном синдроме – с другой, в основу разработанных систем положен анализ таких параметров функции внешнего дыхания, как пульс, сатурация и частота дыхания, а также концентрация алкоголя в глубоком альвеолярном выдыхаемом воздухе. При этом кислородную терапию предложено проводить ингаляционным методом при повышенном давлении в диапазоне 0,13–0,16 атм. Преимуществами использования данного диапазона невысокого повышенного давления по сравнению с диапазоном 2–3 атм., применяемым при гипербарической оксигенации, являются: высокий лечебный эффект, безопасность, отсутствие противопоказаний за исключением клаустрофобии, гипертонического криза и диабетической комы.

Разработанная портативная система оксигенации под избыточным давлением выполняет измерение содержания кислорода в артериальной крови пациента и частоты его сердечных сокращений и, кроме того, концентрации кислорода и температуры воздуха внутри корпуса системы. Исходя из результатов анализа измерений, система определяет статус оксемии пациента и обеспечивает автоматизированный контроль и коррекцию доли вдыхаемого кислорода, а также положительного давления и температуры воздуха внутри корпуса системы.

Сочетание оксигенации под избыточным давлением с методами медикаментозной терапии позволяет оптимизировать время лечения пациентов с алкоголизмом, а также избежать осложнений в случае тяжелого течения, так как кислород потенцирует действие психотропных и антигистаминных препаратов, снижает резистентность организма к инсулину и другим лекарственным веществам. Следовательно, возможно значительно уменьшить дозировку лекарственных препаратов, а зачастую осуществлять и безмедикаментозную терапию. В ходе апробации предложенной системы на базе государственного учреждения «Республиканский научно-практический центр психического здоровья» установлено, что нормоксическая лечебная компрессия в комплексном лечении более эффективна чем гипербарическая оксигенация, в отношении снижения тяжести патологического влечения к алкоголю, преимущественно из-за вегетативного компонента. Предложенная система также может применяться для лечения синдрома дыхательной недостаточности различного генеза.

В свою очередь система контроля содержания алкоголя в крови персонала мобильных и стацио-

нарных объектов ввиду применению электрохимического датчика, который в отличие от полупроводникового не реагирует на посторонние запахи при приеме медикаментов, воспалительных процессах во рту, заболеваниях желудка, а также на пары ацетона, бензина, отличается высокой точностью и избирательностью к этанолу в выдыхаемом воздухе. Что обеспечивает достоверность результатов, которая наряду с документированностью и датированностью относится к основным принципам доказательности. Являющейся, ввиду последствия решений, основанных на результатах количественного анализа алкоголя в выдыхаемом воздухе, основным требованием к результатам измерений.

Отдельное внимание при разработке предлагаемых систем уделено обеспечению конфиденциальности и целостности информации при ее обработке, хранении и передаче в формате HL7-сообщений. Обосновано применение алгоритма шифрования Twofish, характеризующегося более высоким быстродействием при шифровании как малых, так и больших массивов данных по сравнению с другими алгоритмами, рекомендуемыми в настоящее время NIST.

Таким образом, анализ параметров модели дыхательной системы человека позволил предложить систему персонализированной ингаляционной кислородной терапии при повышенном давлении для лечения как синдрома дыхательной недостаточности, так и алкогольного абстинентного синдрома, а также разработать систему контроля содержания алкоголя в крови персонала мобильных и стационарных объектов и блокирования доступа к аппаратно-программным средствам указанных объектов для тех представителей персонала, в отношении которых установлен факт отклонения от нормы показателей их здоровья.

Литература

1. Dawson, D. A. Alcohol consumption, alcohol dependence, and all-cause mortality / D. A. Dawson // *Alc. Clin. Exp. Res.* – 2000. – V. 24, №1. – P. 72–81.
2. Mokdad, A. H. Actual causes of death in the United States / A. H. Mokdad // – 2000. – V. 291, № 10. – P. 1238–1245.
3. Система удаленного мониторинга и управления мобильными и стационарными объектами и контроля содержания алкоголя в крови персонала этих объектов: пат. 7487 Респ. Беларусь / О. Б. Зельманский, Б. В. Зельманский – u20110066; заявл. 11.02.2011; опубл. 06.05.2011 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці.* – 2011. – № 4(81). – С. 220–221.
4. Портативная система гипербарической оксигенации: пат. 11669 Респ. Беларусь / О. Б. Зельманский, Б. В. Зельманский, Е. И. Давидовская, О. А. Иванушич – u 20170277; заявл. 15.08.2017; опубл. 01.02.2018// *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці.* – 2018. – № 2(121). – С. 154.

УДК 621.313

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Исаев А. В., Суходолов Ю. В., Купреенко К. А., Койро А. В., Лычковский В. А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Одной из наиболее существенных проблем современно энергетики, приборо- и станкостроения является разработка приборов и методов диагностики состояния электрических машин. Целью исследований является рассмотрение существующих методов и подходов к вопросам диагностики состояния электрических машин, в том числе и их токоведущих частей, и оценить их возможность для использования как в качестве инструментов прогнозирования остаточных ресурсов использования оборудования, так и возможности применения этих методов непосредственно в рабочих циклах эксплуатации этого оборудования.

Ключевые слова: диагностика электрических машин, методы оценки состояния электрических машин, состояние обмоток токоведущих частей, сопротивление межвитковой изоляции обмоток, методы оценки состояния электрических машин.

CURRENT PROBLEMS OF EXISTING METHODS OF ASSESSING THE CONDITION OF ELECTRIC MACHINES

Isaev A., Sukhodolov Y., Kupreenko K., Koyro A., Lychkovskiy V.

*Belarusian national technical university
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. One of the most significant problems of modern power engineering, instrument-making and machine-tool manufacturing is the development of devices and methods for diagnosing the state of electrical machines. The aim of the research is to consider existing methods and approaches to the issues of diagnosing the state of electrical machines, including their current-carrying parts, and to assess their possibility for use both as tools for predicting the residual resources of equipment use, and the possibility of using these methods directly in the working cycles of operation of this equipment.

Key words: diagnostics of electrical machines, methods for assessing the condition of electrical machines, condition of windings of current-carrying parts, resistance of interturn insulation of windings, methods for assessing the condition of electrical machines.

*Адрес для переписки: Исаев А. В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: isaevav@bntu.by*

Одной из наиболее существенных проблем современно энергетики, приборо- и станкостроения является разработка приборов и методов диагностики состояния электрических машин. При этом увеличение эксплуатационных требований к такому оборудованию только усугубляет существующую проблему. И весь комплекс методов и приборов, как используемых в промышленности, так и существующих в виде экспериментальных и научных образцов очень ограниченно позволяет проводить качественную, и самое главное своевременную диагностику электрических машин, позволяющие зафиксировать начало дефектообразования в них на максимально ранних стадиях развития, и, тем более, проводить исследования непосредственно в режиме эксплуатации оборудования. Поэтому целью данных исследований является рассмотрение существующих методов и подходов к вопросам диагностики состояния электрических машин, в том числе и их токоведущих частей, как наиболее слабому месту подобного оборудования, и оценить их возможность для использования как в качестве инструментов для прогнозирования ресурсов использования

оборудования, так и возможности применения этих методов непосредственно в рабочих циклах эксплуатации этого оборудования.

Существующие методы контроля состояния обмоток электрических машин обладают самым разнообразным набором признаков, которые позволяют систематизировать их применение [1, 2]. Так все представленные методы можно разделить на три группы:

- 1) методы, основанные на контроле косвенных параметров (методы теплового и виброконтроля);
- 2) методы, основанные на фиксации изменения магнитного поля. Среди данного класса методов можно выделить такие как: методы измерения и анализа внешнего магнитного поля электродвигателя, методы измерения и анализа магнитного потока в зазоре и методы определения параметров «выбега» электрических машин;
- 3) методы, основанные на контроле электрических параметров обмоток электрических машин. Это класс существующих методов является самым широким и включает в себя измерение различными способами активного и (или) реактивного сопротивления, определение наличия коронных разрядов,

оценка параметров тока холостого хода и добротности контура, создаваемого катушками обмоток диагностируемых электрических машин и другое.

При этом наличие большого количества разработанных современных методов, как показала ситуация с ремонтом и обслуживанием подобного оборудования, практически нисколько не решают существующие проблемы в своевременной диагностике и работы в этом направлении постоянно проводятся и анализируются. Кроме этого, согласно поведенному исследованию в ряде стран содружества и дальнего зарубежья (рисунок 1) в большинстве случаев (иногда достигающих 70 и даже 80%) оценка состояния диагностируемого оборудования на производстве, в том числе находящегося в режиме эксплуатации, проводится по анализу температуры, выделяющейся при его работе.

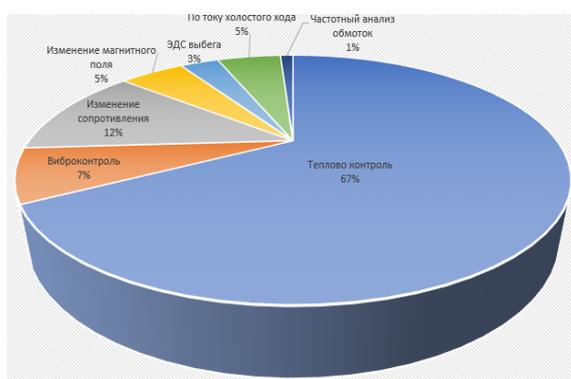


Рисунок 1 – Основные методы диагностики состояния электрических машин

Особенностью и самым главным достоинством теплового контроля, является его простота и интуитивность. Сопровождаемая повышенным выделением тепла неисправность в электрической машине заметна зачастую даже не вполне квалифицированному обслуживающему персоналу. Однако излишнее выделение тепла чаще всего сопровождается в уже неисправном, и, в какой-то мере, неработоспособном оборудовании. Поэтому такой метод, как и виброконтроль, мало применим при своевременной диагностике оборудования, когда в основу положено определение исправности.

Другим, наиболее методом контроля состояния электрических машин является определение электрического сопротивления обмоток. Этот метод популярен в связи с тем, что базовым электроизмерительным прибором можно измерить и легко сравнить значения сопротивления как с номиналом, так и друг с другом, помимо этого данный метод позволяет проверить межфазное короткое замыкание или кз на корпус двигателя. Для выполнения данных измерений разработаны целые комплексы позволяющие проводить все из-

мерения автоматически. Главными достоинствами данного метода является простота реализации и не высокая квалификация персонала. Недостатками не высокая достоверность результатов и необходимость изъятия оборудования.

Для проведения такого контроля существует прибор ИДО-07, который, согласно документации, позволяет: обрывы фаз, межвитковые КЗ, неправильное соединение фаз. Так же для диагностики состояния обмоток можно использовать измеритель параметров электроизоляции ТМ-2501, который представляет собой цифровой мегаомметр предназначенный для измерения сопротивления изоляции кабельных линий, проводов и др.

На данный момент для двигателей с номинальным напряжением 3–6 кВ используются методы частичных разрядов [3], основанные на улавливании частичных обратимых разрядов. К приборам работающих на данном принципе можно отнести TGA-B. Для обнаружения частичных разрядов во вращающемся оборудовании, а также для обнаружения частичных разрядов в изоляции обмоток статора получил распространение датчик-тестер коронных разрядов PPM CORONA PROBE. Однако применение таких устройств возможно только при диагностике сверхмощного оборудования мощностью более 100 кВт, поэтому малоприменимо для анализа состояния в приборах и станках.

Одним из самых активно развивающихся методов на сегодняшний день, это методы определяющие состояние ЭМ по анализу тока или напряжения холостого хода [4] и методы оценивающие изменение добротности контура, создаваемое катушкой статора. Однако, даже с учетом высокой достоверности результатов диагностики они больше применимы в диагностических лабораториях при исследовании и мало пригодны в условиях эксплуатации оборудования на производстве. Однако потенциал у этих методов огромный и далеко не исчерпан для решения поставленных задач.

Литература

1. Дайнеко, В. А. Методы диагностики асинхронных электродвигателей в рабочих режимах и перспективы их применения / В. А. Дайнеко, Ж. Г. Юрковец // Агропанорама. – 2021. – № 4(146). – С. 22–25.
2. Волчихин, В. И. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин // Воронеж: Кварта, 2004. – 312 с.
3. ГОСТ 20074-83. Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов. введ. 01.07.84. – М.: Ордена «Знак Почета» Изд-во стандартов, 1984. – 22 с.
4. ГОСТ ISO 20958-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя: введ. 11.01.16. – М.: Стандартинформ, 2016. – 24 с.

УДК 621.373.826

ЛАЗЕРНЫЙ СЕНСОР ДЫМА И ТЕПЛООВОГО КОНВЕКЦИОННОГО ПОТОКА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Кзаков В. И., Рывкина Я. А., Параскун А. С.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП)
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Представлена схема и техническая реализация лазерного сенсора комбинированного принципа с возможностью обнаружения дыма и теплового конвекционного потока. Выполнены экспериментальные исследования по регистрации появления дыма и теплового конвекционного потока и выполнена компьютерная обработка полученных результатов. Приведен анализ возможностей внедрения нейронных сетей в сферу пожарной безопасности, в частности, в разработанный лазерный сенсор. Выполнена оценка эффективности применения нейронных сетей в этой задаче.

Ключевые слова: лазерный сенсор, тепловой поток, дым, нейронная сеть, обработка сигналов.

LASER SMOKE AND HEAT CONVECTION FLOW SENSOR USING NEURAL NETWORKS

Kazakov V., Ryvkina Y., Paraskun A.

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The scheme and technical implementation of the laser sensor of the combined principle with the ability to detect smoke and heat convection flow are presented. Experimental studies on the registration of the appearance of smoke and heat convection flow are carried out and computer processing of the obtained results is performed. An analysis of the possibilities of introducing neural networks into the field of fire safety, in particular, into the developed laser sensor, is given. An assessment of the effectiveness of using neural networks in this task is performed.

Key words: laser sensor, heat flow, smoke, neural network, signal processing.

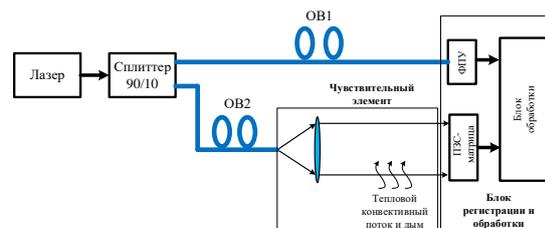
Адрес для переписки: Кзаков В. И., ул. Большая Морская, 67, г. Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, e-mail: kvi@guap.ru

Введение. Применение лазерно-оптических технологий в задаче обнаружения теплового конвекционного потока является одним из перспективных направлений научных исследований, что подтверждается работами [1, 2]. Возгорание является экзотермической реакцией с выделением тепла, что приводит к случайным изменениям показателя преломления воздуха (тепловой конвекционный поток). Представленные в работах [3] результаты по исследованию влияния турбулентности атмосферы, наличия микрочастиц в воздухе на характеристики лазерных пучков, распространяющиеся в такой среде, позволяют утверждать, что по динамике изменения профиля лазерного пучка можно получить также информацию о наличии теплового конвекционного потока.

Схема лазерного сенсора. Структурная схема комбинированной системы обнаружения появления возгорания, основанная на регистрации и последующей обработке пространственных характеристик лазерного пучка, взаимодействовавшего с тепловым конвективным потоком и дымом представлена на рисунке 1 [4].

Система работает следующим образом. Излучение от лазера разделяется на 2 канала на сплиттере (90/10), причем большая часть мощности идет в основной канал по оптоволокну (ОВ2). Опорный канал (ОВ1) требуется для контроля параметров лазерного источника. На выходе из ОВ2 формируется лазерный пучок большого диаметра

(несколько сантиметров) для более эффективного взаимодействия с тепловым конвективным потоком. Далее лазерный пучок распространяется в контролируемом пространстве и попадает на ПЗС-матрицу блока регистрации и обработки сигналов. После детектирования оптических сигналов фотоприемным устройством и ПЗС-матрицей электрические сигналы подаются в блок обработки.



ОВ – оптоволокну; ФПУ – фотоприемное устройство

Рисунок 1 – Схема лазерного сенсора

Структурная схема блока обработки представлена на рисунке 2.

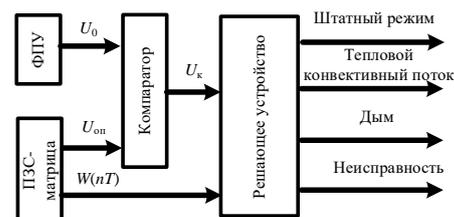


Рисунок 2 – Структурная схема блока обработки

Принципы комбинированного обнаружения возгорания реализовано в блоке обработки сигналов. Остановимся подробнее на логике его работы. Этот блок регистрирует пространственное распределение пучка попиксельно и передает информацию о профиле пучка в блок обработки в цифровом виде в форме отсчетных значений интенсивности. В блоке обработки происходит компьютерная обработка полученных значений и формируется сигнал, отражающий динамику взаимодействия теплового конвективного потока и лазерного пучка. Одновременно происходит сопоставление уровней сигнала U_0 и $U_{оп}$ на компараторе. Полученный сигнал как разность этих двух уровней также поступает в блок обработки. На основании информации о полученных уровнях сигналов блок обработки выдает четыре вида оповещений: штатный режим работы, дым, тепловой конвективный поток, неисправность.

Экспериментальные исследования. Проведен ряд экспериментальных исследований, которые заключались в исследовании динамики профиля лазерного пучка при отсутствии и появлении теплового конвекционного потока. В течение 15 секунд велась регистрация выборок распределения профиля интенсивности пучка. Время накопления каждой выборки составляло 10 мкс.

В общей сложности было проведено 3 эксперимента, при этом изменялась длина чувствительной области, которая составила 0,5, 1 и 3,5 м соответственно.

Для наглядного представления флуктуаций лазерного пучка на таблице 1 приведены 3-D графики, отражающие динамику изменения распределения профиля интенсивности пучка при отсутствии и появлении теплового конвективного потока.

Таблица 1 – Динамика профиля лазерного пучка

	$l=0,5$ м	$l=1$ м	$l=3,5$ м
Без ТКП			
С ТКП			

Для обработки был использован корреляционный метод обработки сигналов, заключающийся в расчете взаимно-корреляционной функции двух соседних выборок. Кроме того, авторами был использован второй метод обработки полученных результатов, который заключается в расчете интегрально-разностной функции, отражающей попиксельную разность зарегистрированных распределений интенсивностей профиля пучка.

На рисунке 3 приведен результат сопоставления эффективности использованных методов обработки.

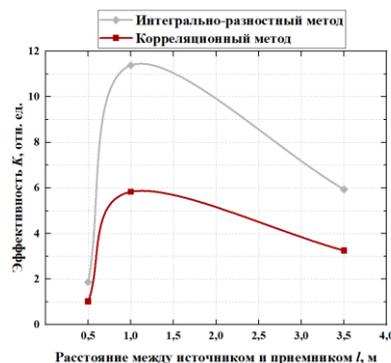


Рисунок 3 – Оценка эффективности методов обработки

При оценке эффективности методов обработки предпочтительнее оказывается интегрально-разностный метод.

Несмотря на положительные результаты эксперимента, остается проблема вероятности ложных срабатываний из-за естественных тепловых потоков. Для ее решения предложено использование более сложных методов обработки, такие как нейронные сети. Нейросети уже показали свою эффективность в пироэлектрических пожарных датчиках. Основными этапами при такой постановке задачи являются выбор оптимальной нейросети и ее обучение.

Для оценки эффективности нейросети в задаче раннего обнаружения возгораний лазерно-оптическими методами использовался ряд параметров, таких как точность, прогнозируемость, устойчивость и вычислительная эффективность. Установлено, что для комплексной оценки лучше использовать несколько метрик, чтобы получить полное представление о том, как сеть справляется с задачей и насколько она пригодна для реальных применений.

Литература

1. Kazakov, V. I. Computer Processing of Laser Beam Profile Dynamics Changing During Interaction with a Thermal Convective Flow / V. I. Kazakov // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2023. – V. 597. – P. 972–979.
2. Beam displacement as a function of temperature and turbulence length scale at two different laser radiation wavelengths / W. M. Isterling [et al.] // Appl. Opt. – V. 51. – 2012. – P. 55–63.
3. Деформация и блуждание вихревых пучков в искусственной конвективной турбулентности / А. В. Фалиц [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 2023. – Т. 36, № 8 (415). – С. 619–630.
4. Патент РФ 2805772 Волоконно-оптический датчик дыма и теплового конвекционного потока / В. И. Казаков, С. Н. Мосенцов, А. С. Параскун. – Оpubл. 24.10.2023.

УДК 539.21.6: 539.1,04

**КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ ОКОЛОЗЕМНОГО
КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
АЭРОКОСМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР**

Камышан А. С., Комаров Ф. Ф., Пилько В. В., Пилько В. В.

*НИУ «Институт прикладной физики имени А. Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Программно-аппаратный комплекс разработан для исследования влияния высокого вакуума, облучения кислородной плазмой и потоками квантов в диапазоне энергий от вакуумного ультрафиолета до ближней инфракрасной области на оптические, термоизоляционные и трибологические свойства образцов функциональных материалов космического аппарата (КА) в широком диапазоне доз облучения, моделирующих реальные условия эксплуатации. Позволяет измерять и рассчитывать коэффициенты отражения, трения скольжения, определять износостойкость плоских образцов в паре со стандартными тестовыми дисками, регистрировать коэффициент трения в зависимости от времени испытаний и вакуумных условий, измерять потери массы образца и рассчитывать температуропроводность материала.

Ключевые слова: вакуум, ультрафиолетовое, ионное, инфракрасное облучение, трибология.

**COMPLEX FOR STUDYING THE INFLUENCE OF NEAR-EARTH SPACE FACTORS ON THE
PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF AEROSPACE MATERIALS AND INSTRUMENT
STRUCTURES**

Kamyshan A., Komarov F., Pilko V. (Sr), Pilko V.

*A. N. Sevtschenko Institute of Applied Physics Problems BSU
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The software and hardware complex is designed to study the influence of high vacuum, irradiation with oxygen plasma and quantum fluxes in the energy range from vacuum ultraviolet to near-infrared region on the optical, thermal insulation and tribological properties of samples of functional materials of the spacecraft (SC) in a wide range of radiation doses, simulating real operating conditions. Allows to measure and calculate reflection coefficients, sliding friction, determine the wear resistance of flat samples paired with standard test disks, record the friction coefficient depending on test time and vacuum conditions, measure sample mass loss and calculate the thermal conductivity of the material.

Key words: vacuum, ultraviolet, ion, infrared irradiation, tribology.

*Адрес для переписки: Комаров Ф. Ф., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: komarovf@bs u.by*

В связи с созданием в Республике Беларусь собственных космических аппаратов (КА) появилась необходимость в исследовании стойкости конструкционных материалов и изделий электроники, используемых при изготовлении спутников Земли, к воздействию основных факторов околоземного космического пространства. К основным воздействующим на КА факторам можно отнести вакуум, колебания температуры, облучение фотонами и потоками ионов. Для механических устройств КА чрезвычайно критичны также трибологические параметры, такие как коэффициент трения и износ. Разработка новых перспективных конструкционных материалов для КА позволяет существенно повысить срок службы изделий, однако ускорение процессов разработки возможно лишь при использовании новых экспрессных методов контроля эксплуатационных характеристик [1]. Для этой цели необходимо иметь экспериментальные установки, позволяющие в широком диапазоне параметров проводить ускоренное моделирование

процессов эволюции структуры и свойств аэрокосмических материалов и изделий полупроводниковой техники при воздействии основных факторов околоземного космического пространства.

Полный цикл испытаний позволяет свести к минимуму отказы оборудования либо разрушение элементов конструкции, обусловленное:

- низкой стойкостью к влиянию вакуума и высоким газовыделением;
- несогласованностью температурных коэффициентов расширения элементов конструкции и нарушенным тепловым балансом;
- низкой стойкостью к воздействию кислородной плазмы;
- аномально высоким коэффициентом трения и схватыванием трибосопряжений в вакууме, низкой износостойкостью антифрикционных покрытий;
- неприемлемыми значениями коэффициентов поглощения либо отражения фотонов, деградацией отражательной способности.

Оптимизация этих характеристик значительно повышает надежность и ресурс работы КА.

Разработанный комплекс позволяет с использованием одного поста высоковакуумной откачки проводить:

- исследование устойчивости материалов и узлов КА к воздействию высокого вакуума;
- облучение образцов фотонами в диапазоне длин волн 185–570 нм;
- температурные воздействия в диапазоне от -75°C до $+150^{\circ}\text{C}$;
- воздействие на мишень кислородной плазмы с плотностью не менее 10^{13} частиц/см²·с и реализацию измерения коэффициента трения с точностью не хуже 0,02 в условиях вакуума не более $8 \cdot 10^{-5}$ Па;

– определение величины износа элементов трибосопряжений и антифрикционных покрытий после функционирования в вакууме.

С целью повышения плотности ионного тока и экспрессности процесса облучения разработан оригинальный инновационный прямопоточный источник ионов. Новизна разработки подтверждена патентом [2]. Источник работает на газах и газовых смесях и использует для иницирования разряда подогреваемый катод. В диапазоне давлений от 10^{-5} до 10^{-1} Па при эмиссионных токах катода на уровне 20 мА ток на держателе пропорционален вакууму, измеренному манометром РКР–251. Профиль ионного пучка, экстрагированного через круглое отверстие диаметром 10 мм, просканирован на расстоянии 50 мм от торца источника с помощью электрометрического зонда диаметром 0,5 мм в двух взаимно ортогональных направлениях В и С. Результат измерений представлен на рисунке 1.

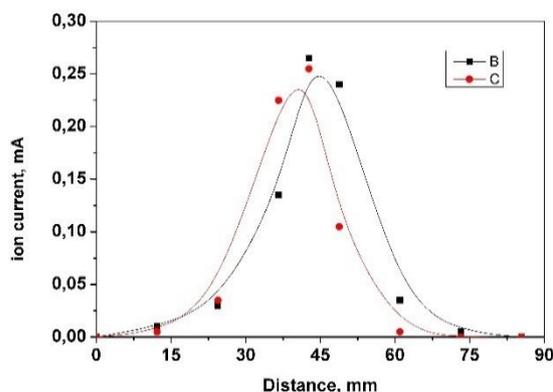


Рисунок 1 – Профиль ионного пучка, экстрагированного через круглое отверстие диаметром 10 мм

Двухнитевая схема катода и сильно локализованное магнитное поле позволяют реализовывать как прямую ударную ионизацию потока рабочего газа, так и режим дугового разряда, причем, в обоих случаях, катод служит элементом электростатической фокусирующей системы в соответствии с патентом [2].

С целью снижения газовой нагрузки на систему откачки от механизма привода и повышения помехоустойчивости устройств регистрации разработан оригинальный вакуумный узел трибометрии «диск на плоскости». Новизна разработки подтверждена патентами [3, 4] и серебряной медалью конкурса инновационных проектов «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» в рамках НИ-ТЕСН и Петербургской технической ярмарки 24–26 апреля 2022 года.

Типичный пример результатов трибометрии представлен на рисунке 2.

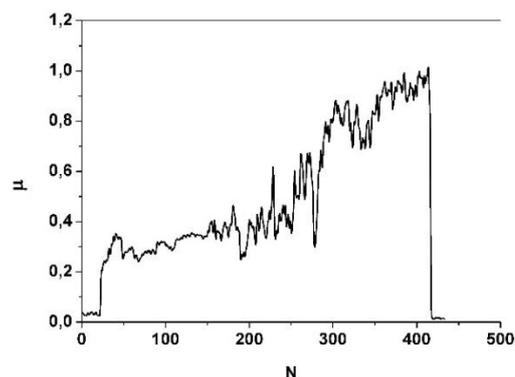


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента трения от числа оборотов N для диска из полированной нержавеющей стали в паре со сплавом Д16

Как видно из рисунка, методика позволяет фиксировать момент начала разрушения пассивирующего оксидного слоя на образце при 150 оборотах диска и переход к когезионному взаимодействию материалов трибопары, сопровождающемуся осцилляциями и увеличением коэффициента трения до единицы. Заметно, что дрейф нуля за время испытаний не превышает 5–6 % от регистрируемого амплитудного значения. Чувствительность регистрации коэффициента трения на максимальном пределе близка к 0,01.

После регистрации временной зависимости коэффициента трения сформированный трек износа может быть исследован оптическими методами и путем профилометрии.

Литература

1. Климович И. М. Структура, оптические и электрофизические свойства наноструктурированных Ti-Al-N и Ti-Al-C-N покрытий для космической техники. «Перспективные материалы и технологии» – Т.1. – Витбск: УО «ВГТУ», 2019. – С.179–193
2. Патент РБ 13125 МПК H01J. Источник ионов / Пилько, В. В. (ст), Пилько В. В. – Оpubл. 12.01.2023.
3. Патент РБ 12535 МПК G01N 19/02. Устройство для измерения коэффициента трения / Пилько, В. В. (ст), Пилько В. В. – Оpubл. 28.02.2021.
4. Патент РБ 12676 МПК G01L 3/14. Устройство для измерения крутящего момента / Пилько, В. В. (ст), Пилько В. В. – Оpubл. 15.06.2021.

УДК 621.391

ЗАЩИТА ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОЙ ПОДМЕНЫ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЛЕКСА ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИГНАЛОВ

Карташова Ж. К.

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

Аннотация. Представлена краткая характеристика разработки аппаратно-программного средства защиты интерактивного телевизионного вещания. Базой для решения выбрана сверхбольшая интегральная микросхема (СБИС).

Ключевые слова: интерактивное телевидение, сверхбольшая интегральная микросхема, программное обеспечение, управляющее программное обеспечение.

PROTECTION AGAINST UNAUTHORIZED SUBSTITUTION OF THE SOFTWARE OF THE DIGITAL TELEVISION SIGNAL PROCESSING COMPLEX

Kartashova J.

*Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russian Federation*

Abstract. A brief description of the development of hardware and software protection for interactive television broadcasting is presented. An ultra-large integrated circuit (VLSI) was chosen as the basis for the solution.

Key words: interactive television, an ultra-large integrated circuit, software, control software.

Адрес для переписки: Карташова Ж. К., ул. Вторая Бауманская, 5, г. Москва 107005, Российская Федерация, e-mail: iu8-bmsu@yandex.ru

В настоящее время во всем мире и, в частности, в России крайне активно развивается отрасль предоставления широкополосного доступа в интернет. По данным Министерства связи и массовых коммуникаций Российской Федерации в данной отрасли наблюдаются стабильный прирост абонентов широкополосного доступа к сети интернет, увеличение доходов операторов связи, увеличение средней скорости доступа к сети. Кроме того, министерство связи и массовых коммуникаций Российской Федерации имеет амбициозный план развития данной отрасли на ближайший период: согласно плану широкополосный доступ к сети интернет на скорости 100 Мбит и более будут иметь до 90 % населения России, доступ в интернет будет возможен из любого вида транспорта, а также в тоннелях метро, а сети мобильной связи четвертого поколения будут работать на большей части огромной территории.

Интерактивное телевидение. Одним из примеров такой технологии, которая активно развивается и завоевывает внимание потребителей, является интерактивное телевидение (IPTV): технология цифрового телевидения в сетях передачи данных по протоколу IP, новое поколение телевидения. В качестве клиентского оборудования могут выступать компьютеры, соответствующие системным требованиям, комплексы обработки цифровых телевизионных сигналов (специализированные ТВ-приставки), мобильные и другие устройства. На программном уровне доступ к ресурсам IPTV может осуществляться, как при помощи специального программного обеспечения, так и при помощи обычного интернет-браузера, встроенного в устройство. Наибольшую популяр-

ность у пользователей получили ТВ-приставки: многие поставщики услуг широкополосного доступа к сети интернет при подключении нового абонента предоставляет такую приставку бесплатно. Однако же во всех устройствах, которые могут быть использованы для просмотра IPTV есть информация, которая составляет коммерческую тайну и должна быть защищена тщательнейшим образом.

Средство защиты. Необходимой является разработка средств защиты для комплекса обработки цифровых телевизионных сигналов, которые будут препятствовать возможной подмене программного обеспечения комплекса с целью несанкционированного доступа к информации, содержащейся в комплексе.

В рамках исследований, проведенных в МГТУ им. Н. Э. Баумана были рассмотрены особенности работы микросхемы СБИС К1879ХБ1Я и предложены способы и средства для защиты комплекса обработки цифровых телевизионных сигналов на основе этой СБИС от несанкционированной подмены программного обеспечения.

Для создания средств защиты от несанкционированной подмены программного обеспечения данного комплекса проведен сравнительный анализ нескольких алгоритмов с целью определить оптимальный с учетом особенностей СБИС К1879ХБ1Я и требований заказчика. Выбранный алгоритм ЭЦП реализован и интегрирован с программным обеспечением комплекса. Также осуществлен анализ аппаратных особенностей СБИС К1879ХБ1Я и на их основе разработан, реализован и интегрирован механизм для защиты загрузчика высокого уровня комплекса обработки цифровых телевизионных сигналов.

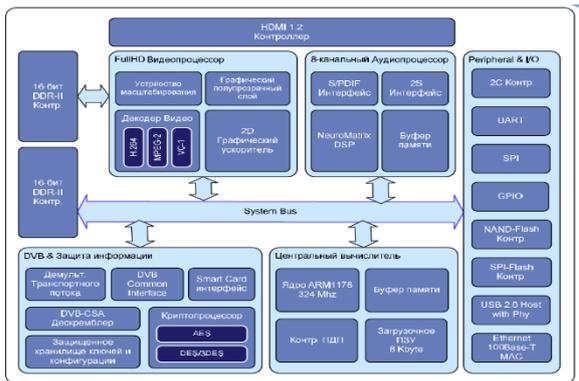


Рисунок 1 – Функциональная схема СБИС K1879XB1A

Основные характеристики микросхемы СБИС K1879XB1A (процессор):

- ядро процессора ARM1176JZF-S;
- кэш команд – 16 КБ;
- кэш данных – 16 КБ;
- сверхоперативная память команд (TCM) – 16 КБ;
- сверхоперативная память данных (TCM) – 16 КБ;
- блок управления памятью MMU;
- блок трассировки и отладки ETM11CSSingle;
- возможность байтового доступа к памяти;
- возможность невыровненного доступа к памяти;
- возможность использования Little Endian и Big Endian порядка байт.

Программное обеспечение. ПО комплекса обработки цифровых телевизионных сигналов пред-

ставляет собой прототип полного комплекта программного обеспечения ресивера цифрового телевидения. Основным назначением программного обеспечения комплекса обработки цифровых телевизионных сигналов является использования его в качестве референсного ПО и SDK для разработки управляющего ПО для серийных ресиверов.

ПО комплекса обработки цифровых телевизионных сигналов имеет многоуровневую организацию, при которой за каждым уровнем закреплена своя функциональность.

Уровень загрузчика необходим для выполнения первоначальной загрузки дистрибутива ОС Linux, предназначенного для управления комплексом обработки цифровых телевизионных сигналов. Загрузка выполняется в две фазы. Уровень ОС предназначен для управления аппаратурой комплекса обработки цифровых телевизионных сигналов и предоставления программных интерфейсов для уровня сервисов.

Литература

1. Документация СБИС K1879XB1A [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://module.ru/upload/files/k1879hb1ya.pdf>.
2. Исходные коды загрузчика U-BOOT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.denx.de/wiki/U-Boot/SourceCode>.
3. Керниган, Б. У., Деннис М. Ритчи Язык программирования C / Б. У. Керниган, Д. М. Ритчи. – Вильямс. – 2019 г. – 253 с.
4. Документация для средств кросс-платформенной разработки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://crosstool-ng.org/>.

УДК 004.934.2

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ

Ковыньёв Н. В.

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

Аннотация. В области цифровой обработки сигналов, обработка речи занимает разностороннее использование, из-за этого она является областью интенсивных исследований. В данной статье проведен обзор различных методов обработки речи.

Ключевые слова: обработка речевых сигналов, вейвлет преобразование, преобразование Фурье.

METHODS FOR PROCESSING SPEECH SIGNALS

Kovyunov N.

*Bauman Moscow state technical university
Moscow, Russian Federation*

Abstract. In the field of digital signal processing, speech processing has many uses, so it is still an area of intense research. This article will provide an overview of various speech processing methods/

Key words: speech signals processing, wavelet transform, Fourier transform.

*Адрес для переписки: Ковыньёв Н. В., ул. Вторая Бауманская, 5, г. Москва 107005, Российская Федерация
e-mail: nvkovynov@bmsu.ru*

Обработка речевых сигналов – большая область науки, которая включает в себя следующие задачи: распознавание, фильтрация, подавление шума, определение информативных параметров.

Каждая задача решается при помощи определенных методов, которые используются в зависимости от области обработки: частотная область (в данной области методы обработки заключаются в

использовании всех отсчетов данных, которые зарегистрированы в речевом сигнале), временная область (в данной области методы обработки заключаются в определении характерных точек речевого сигнала с последующим использованием их для анализа), частотно-временная область (в данной области методы обработки заключаются в комбинированном подходе из частотных и временных областей с минимальным проявлением их недостатков).

Наиболее распространенным способом, который используется не только в речевой обработке, является преобразование Фурье в частотной (1) и временной (2) областях:

$$S(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)e^{-jw t} dt, \quad (1)$$

$$S(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(w)e^{jw t} dw. \quad (2)$$

Так как речевой сигнал часто определяют в дискретном виде, как сумму гармонических составляющих сигнала, то в задачах цифровой обработки применяют дискретное (3) преобразование Фурье:

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(nT)e^{-jkwnT}, \quad (3)$$

где k – номер гармоники; w – частота первой гармоники; $0 < n < N$ – дискретные отсчеты времени; T – период частоты дискретизации [1].

Несмотря на широкое распространение преобразования Фурье, многие задачи обработки речевых решаются при помощи вейвлет-преобразования.

Вейвлет-преобразование задается материнским вейвлетом – функция, локализованная как во временной, так и в частотной области. Материнский вейвлет (4) подвергают воздействию двух операций: сдвиг (перемещение области во времени), масштабирование (сжатие или растяжение, иными словами локализация по частоте) [2]:

$$\Psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t-u}{s}\right), \quad (4)$$

где u, s – параметры сдвига.

Смысл вейвлета – разбиение сигнала на масштабированные и сдвинутые по оси времени версии материнского вейвлета, вычисление коэффициентов корреляции участков исходного сигнала и версий вейвлета по заданному масштабу. В итоге получается набор коэффициентов, которые показывают близость сигнала к вейвлету определенного масштаба. Близость вида анализируемого сигнала к вейвлету указывает на большее абсолютное значение коэффициента. По сравнению с преобразованием Фурье вейвлеты имеют преимущества, так как позволяют анализировать кратковременные локальные особенности сигналов.

Известно, при преобразовании сигнала из временной области в частотную информация представляется более подробно, компактно, наглядно.

Идея данного способа заключается в замене в спектре оси частоты на ось времени, то есть можно сказать, что спектр является просто сигналом. Что позволяет представить исходную спектральную информацию более компактно, каждый гармонический ряд исходного спектра будет представлен одной составляющей в кепстре. Данные свойства спектрального представления позволяют анализировать информацию при помощи кепстра, кепстрального анализа. Кепстр – спектр логарифма спектра исходного сигнала, иными словами – первоначальный спектр представлен в логарифмическом масштабе (5):

$$C_s(q) = \frac{1}{2\pi} \int_{+\infty}^{-\infty} \ln(S(w))^2 e^{jw} dw. \quad (5)$$

Данный анализ основан на модели функционирования органов слуха человека, применяет частотную шкалу в мелах, которая моделирует частотную чувствительность человеческого уха.

Анализ с использованием линейного предсказания является одним из часто используемых в решении задач обработки речевых сигналов. Модель основана на предположении, что любой отсчет речевого сигнала можно приближенно оценить линейной комбинацией некоторого числа предшествующих ему отсчетов (6):

$$S(n) = \sum_{i=1}^p a_i s(n-1) = Gu(n), \quad (6)$$

где a_i – коэффициенты предсказания; $u(n)$ – ошибка предсказания; G – коэффициент усиления.

Ошибка предсказания определяется как разность между исходными и приближенно вычисленными (предсказанными) отсчетами (7):

$$u(n) = s(n) - \hat{s}(n) = s(n) - \sum_{k=1}^p a_k s(n-k). \quad (7)$$

Определение набора коэффициентов предсказания, минимизирующих $u(n)$ – основная задача линейного предсказания. Данный параметр можно определить при помощи автокорреляционных и ковариационными методами решения. При помощи коэффициентов предсказания определяют частотную характеристику фильтра, который характеризует состояние голосового тракта в определенный момент времени. Данные методы обеспечивают получение средней оценки анализируемого участка сигнала в частотно-временной области [3].

Корреляционный анализ является определением взаимосвязи двух или нескольких величин, либо величин, которые можно считать таковыми с некоторой степенью точности. Распространение данного метода обеспечено следующими аспектами: коэффициенты корреляции достаточно просты в подсчете, их можно применять без специальной математической подготовки. В анализе речевых сигналов применяются автокорреляционная (определяет статическую взаимосвязь

между величинами из одного речевого сигнала, разложенного в ряд, но взятых со сдвигом) (8) и взаимнокорреляционная (определяет степень корреляции двух последовательностей значений речевых сигналов, разложенных в ряды, взятых со сдвигом) (9) функции.

$$A = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)s(t - \tau)dt, \quad (8)$$

$$B = \int_{-\infty}^{+\infty} s_1(t)s_2(t - \tau)dt, \quad (9)$$

где $s(t)$ – речевой сигнал; τ – сдвиг во времени.

Одним из самых эффективных методов распознавания речевых сигналов является применение нейронных сетей, состоящих из нейронов и организованных между ними связей. Нейроны имеют различные связи между собой, например: аксоны – входные связи нейрона, синапсы – однонаправленные входные связи. По входным связям сигналы возбуждения или торможения передаются последующим нейронам. Каждая однонаправленная связь эквивалентна электрической проводимости. Положительные и отрицательные значения эквивалентны возбужденному или заторможенному состоянию нейрона. Сумма значений всех входов определяет текущее состояние нейрона (10):

$$s = \sum_{i=1}^n e_i w_i. \quad (10)$$

Выходы нейрона является функцией его состояния. При использовании в задачах распознавания нейронных сетей необходимо построить

определенную сеть для задачи, обучить ее множеству речевых сигналов для того, чтобы минимизировать количество ошибок [4].

Рассмотренные методы анализа речевого сигнала показывают, что для более качественного решения задач существуют различные методы, позволяющие исследовать определенные характеристики сигналов. В тоже время стоит отметить, что есть универсальные методы, которые могут давать хорошие результаты для нескольких областей сразу. Стоит отметить, что применение и обучение нейронных сетей позволяет решать задачу анализа речевых сигналов наиболее продуктивно, так как большая часть работы и проверочных действий выполняется на основе полученных знаний для нейронных сетей.

Литература

1. Алимуратов, А. К. Обзор и классификация методов обработки речевых сигналов в системах распознавания речи / А. К. Алимуратов, П. П. Чураков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 2 (12). – С. 27–35.
2. Огнев, И. В. Распознавание речи методами скрытых марковских моделей в ассоциативной осцилляторной среде / И. В. Огнев, П. А. Парамонов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 3 (27). – С. 115–126.
3. Фролов, А. В. Синтез и распознавание речи. Современные решения / Г. В. Фролов. – М.: Связь, 2003. – 216 с.
4. Козлов, А. С. Кепстральный анализ в задачах слепой оценки скорости передачи цифровых данных / А. С. Козлов, В. Н. Малышев // Радиотехника. – 2012. – № 7. – С. 67–71.

УДК 004.934.2

ОБРАБОТКА ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ ИСПОЛЬЗУЯ ВЕЙВЛЕТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ Ковынёв Н. В.

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

Аннотация. Рассматриваются основные теоретические положения вейвлет-преобразования и его свойства, проблема обработки цифровых данных на основе вейвлет-преобразований.

Ключевые слова: вейвлет преобразование, дискретное вейвлет преобразование, непрерывное вейвлет преобразование, базисная вейвлет функция.

DIGITAL INFORMATION PROCESSING USING WAVELET TRANSFORMATION Kovynov N.

*Bauman Moscow state technical university
Moscow, Russian Federation*

Abstract. The main theoretical principles of wavelet transforms and its properties are considered, the problem of digital data processing based on wavelet transforms is considered.

Key words: wavelet transform, discrete wavelet transform, continuous wavelet transform, basic wavelet function.

*Адрес для переписки: Ковынёв Н. В., ул. Вторая Бауманская, 5, г. Москва 107005, Российская Федерация
e-mail: nvkovynov@bmstu.ru*

Информационные технологии широко распространены в нашей жизни, объемы обрабатываемой информации растут высокими темпами. Повышаются требования к обработке информации, ее качеству и скорости. Для уменьшения объема информа-

ции применяются способы сжатия, но необходимо, чтобы в сжатой информации хранились только важные и уникальные части, которые способствовали быстрому восстановлению информации. Существует множество способов и методов для сжатия

информации, наиболее распространенные способы связаны с вейвлет преобразованиями.

Вейвлетом называется семейство математических функций, которые имеют форму маленькой волны с ненулевым значением в центральной области и убывает до нуля по мере удаления от центра. Вейвлеты задаются из материнской функции путем сдвига по времени и изменения временного масштаба. Вейвлет преобразование переводит сигнал из временного представления в частотно-временное и представляет собой свертку вейвлет-функции с сигналом. В результате вейвлет-преобразование содержит в себе комбинируемую информацию об анализируемом сигнале и самом вейвлете, позволяя выделить составляющие сигнала, высокочастотные и низкочастотные.

Преобразование данных для анализа сигналов должно позволять анализировать их на любом промежутке времени и на различных масштабах, пространственную локализацию рекомендуется применять, когда необходимо показать точное расположение деталей объекта (1).

$$\Psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (1)$$

где a – параметр временного масштаба; b – временное смещение вейвлета.

Для обработки и преобразования сигналов используются дискретные и непрерывные (2) вейвлет-преобразования.

$$C(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (2)$$

Непрерывное вейвлет-преобразование плохо приспособлено для численных вычислений. Данное преобразование дает вейвлет-спектры с избыточным количеством информации, потому что использует весь диапазон параметров временного масштаба и временного смещения вейвлета.

Из-за указанных недостатков непрерывного вейвлет-преобразования, на практике чаще всего используют дискретное вейвлет-преобразование. Оно наиболее эффективно так как использует дискретные значения параметров временного масштаба и временного смещения. Данные параметры обычно задаются в виде степенных функций. Дискретные вейвлеты при обработке используются вместе с дискретными масштабирующими функциями. Данная комбинация позволяет восстановить исходные сигналы (3).

$$S(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} C_{a_k} \varphi_k(t) + \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{d_{mk}} a_0^{\frac{m}{2}} \psi(a_0^m t - k). \quad (3)$$

Принято считать, что вейвлеты являются аналогами высокочастотных фильтров, а масштабирующие функции – аналоги низкочастотных фильтров.

Низкочастотные и высокочастотные фильтры являются взаимосвязанными векторами коэффициентов в матричном представлении. Высокочастотный фильтр можно получить из низкочастотного, если записать его коэффициенты в обратном порядке и изменять знак у четных коэффициентов.

Наиболее простыми и широко известными вейвлетами являются вейвлеты Хаара. Они ортогональны и хорошо локализованы в пространстве, но не являются гладкими, симметричными по форме и не обладают хорошей локализацией в частотной форме. Базисная вейвлет функция Хаара имеет вид прямоугольных импульсов и задается как в обычном (4) так и в дискретном представлении (5).

$$\Psi(t) = \begin{cases} 1, 0 \leq t < \frac{1}{2} \\ -1, \frac{1}{2} \leq t < 1, \\ 0, t \notin [0,1) \end{cases} \quad (4)$$

$$\Psi_{m,k} = 2^{\frac{m}{2}} \Psi(2^m t - k), \quad (5)$$

где m – параметр масштаба, k – параметр сдвига.

Преобразование Хаара является парой фильтров, которые разделяют сигнал на низкочастотную и высокочастотную составляющие. Получается, что каждой паре соседних элементов одномерного сигнала ставятся в соответствие два новых сигнала, а именно: аппроксимирующий сигнал, который вычисляется как полусумма элементов, детализирующий сигнал, который вычисляется как полуразность соседних элементов.

Матрица преобразования Хаара задается следующим образом (6):

$$H = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (6)$$

Данная матрица обладает свойством ортогональности, что позволяет задать обратную ей матрицу путем транспонирования (7):

$$H^{-1} = H^T = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Двумерное преобразование Хаара сводится к композиции одномерных преобразований. В таком виде получается, что к каждой строке, а затем столбцу двумерной матрицы применяется одномерное вейвлет-преобразование, в результате получаются четыре матрицы: аппроксимирующая матрица исходного сигнала, вертикальная матрица, горизонтальная матрица, диагональная матрица, которая детализирует исходный сигнал. У вейвлета Хаара есть один недостаток – он не обладает гладкостью.

Вейвлет-преобразования обеспечивают наиболее эффективное решение проблем по части сжатия и обработки цифровой информации. Однако, в дополнение к этому каждая полная каскадная последо-

вательность сжатия двумерных сигналов, или сжатие, включают в себя фазы квантования, кодирования или декодирования информации.

Для выполнения одноуровневых или многоуровневых преобразований вейвлет-декомпозиций по отношению к конкретному вейвлету существуют различные программные продукты, которые позволяют провести анализ исследуемых цифровых данных, построить графики данных анализа, сравнить исходные и полученные результаты, найти различия.

Также вейвлет-преобразования можно использовать при пороговой фильтрации с целью удаления шумовой составляющей сигнала. Данный способ показывает влияние на качество восстановления исходного сигнала многих факторов: уровень вейвлет разложения исходного сигнала, отсутствие монотонной зависимости между уровнем разложения и ошибкой; оказывает влияние и метод пороговой обработки, если использовать не только мягкую пороговую обработку, то можно получить сильные отклонения от исходных данных; также на качество восстановления исходного сигнала влияет способ определения порогового значения; выбор базисного вейвлета, чем более гладкая вейвлет-функция, тем более сглаженным будет восстановленный сигнал.

К сожалению, несмотря на активное развитие исследований, которые направлены на обработку цифровых сигналов, многие проблемы остаются нерешенными. Использование мягкой и жесткой пороговой обработки сигналов приводят к скачкам в восстановленных сигналах, в результате оценки получаются смещенными, что приводит к большому разрыву с исходным сигналом.

Литература

1. Андреев, Д. А. Обработка цифровой информации на основе вейвлет-преобразований / Д. А. Андреев, В. А. Лондинов, О. Ю. Тимошевская // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции, Сочи, 01–10 октября 2021 года. – Москва: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА имени профессора Н. Е. Жуковского содействия сохранению исторического и научного наследия ВВИА имени профессора Н. Е. Жуковского, 2021. – С. 66–70.
2. Вейвлет-анализ в примерах: Учебное пособие / О. В. Нагорнов [и др.]. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 120 с.
3. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
4. Кренкель, Т. Э. Квантовое вейвлет-преобразование Добеши / Т. Э. Кренкель, М. А. Бажанова // Т-СОММ – Телекоммуникации и транспорт. – 2014. – Т.8, №12. – С. 35–40.

УДК 53.082.54

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАТРИЧНЫХ ТЕРМООПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИНФРАКРАСНЫХ СИСТЕМ

Конойко А. И., Кравченко В. М., Кузьмицкая А. С., Малиютина-Бронская В. В., Солодуха В. А.

*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В данной работе отражены результаты работ по разработке функциональной и оптической схем лабораторного стенда для исследования параметров матричного термооптического преобразователя на базе микрорезонаторов Фабри-Перо, функционирующего на основе термооптического эффекта.

Ключевые слова: термооптический преобразователь, измерительный стенд, интерферометр Фабри-Перо, оптическая схема, термооптический эффект.

TEST BENCH OF THE MATRIX THERMO-OPTICAL CONVERTERS BASIC PARAMETERS FOR INFRARED SYSTEMS

Konoiko A., Kravchenko V., Kuzmitskaya H., Malyutina-Bronskaya V., Saladukha V.

*SSPA «Optics, Optoelectronics and Laser Technology»
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. This paper presents the results of the work on the development of functional and optical schemes of a laboratory stand for studying the parameters of a matrix thermo-optical converter based on Fabry-Perot microresonators, operating on the basis of the thermo-optical effect.

Key words: thermo-optical converter, measuring stand, Fabry-Perot interferometer, optical scheme, thermo-optical effect.

Адрес для переписки: Малиютина-Бронская В. В., тр-м Логойский, 22/1-207, г. Минск 220090, Республика Беларусь, e-mail: malyutina@oelt.basnet.by

Введение. В настоящее время активное развитие получило направление тепловизионной техники и инфракрасных систем (ИК-систем) в связи с их широким применением в различных областях науки и техники. Одной из основных задач, стоя-

щих в настоящее время перед разработчиками ИК-систем, является совершенствование элементной базы: создание новых фотоприемных устройств высокого пространственного разрешения; оптических систем, работающих в широком

спектральном диапазоне; снижение масс-габаритных параметров и энергопотребления; уменьшение стоимости компонентов и систем в целом и другие [1]. В качестве возможного решения поставленных выше задач был осуществлен процесс разработки и предварительных исследований неохлаждаемой матричной ИК-системы функционирующей на основе термооптического эффекта, пиксели которой представляют собой микрорезонаторы Фабри-Перо. Установлено, что под воздействием температуры в такой системе происходит сдвиг максимума спектра пропускания.

Проведенные исследования позволили определить максимальное значение коэффициента пропускания резонатора-пикселя, температурный сдвиг максимума коэффициента пропускания на рабочей длине волны, крутизну преобразования ИК-излучения и коэффициент перестройки.

Было показано, что разработанная ИК-система по крутизне преобразования не уступает промышленно выпускаемым болометрическим матрицам на базе оксида ванадия [1–2].

Кроме описанных выше параметров согласно ГОСТ Р 59606–2021 [3] для оценки работоспособности ИК-системы требуется определить обнаружительную способность (измерение мощности эквивалентной шуму), температурное разрешение и постоянную времени (тактовая частота). Поэтому целью данной работы была разработка лабораторного стенда для исследования основных параметров матричных термооптических преобразователей (ТОП).

Описание оптической схемы. На рисунке 1 показаны функциональная (а) и оптическая (б) измерительной установки для исследования основных параметров ТОП.

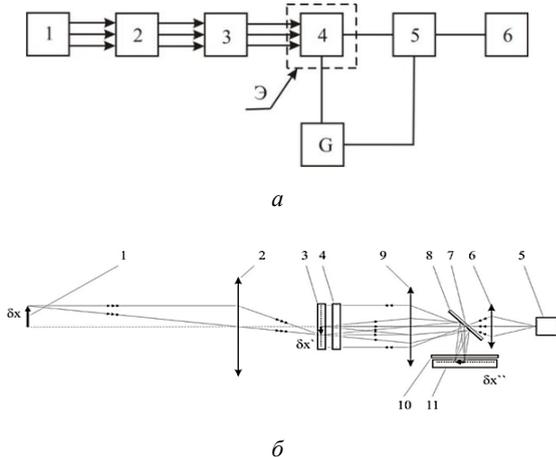


Рисунок 1 – Функциональная (а) и оптическая (б) схемы измерительной установки для исследования основных параметров ТОП

Функциональная схема включает в себя: 1 – источник ИК излучения; 2 – проекционный ИК-объектив; 3 – модулятор; 4 – испытуемый образец ТОП; 5 – фотоприемник; 6 – осциллограф; G –

источник питания; Э – светозащитный экран. Проекционный ИК объектив 2 проецирует изображение источника ИК излучения на входное окно испытуемого образца термооптического преобразователя 4, которое является одновременно входным окном прозрачным для ИК-излучения. Модулятор 3 периодически прерывает поток ИК-излучения тем самым обеспечивая соответственно минимальный и максимальный уровни ИК-излучения на входном окне испытуемого образца ТОП.

Оптическая схема включает в себя источник ИК излучения (1), проекционный ИК-объектив (2), оптически связанный с ИК-входом матрицы термочувствительных микрорезонаторов (3), широкоапертурный резонатор (4), источник считывающего излучения видимой области спектра (5), последовательно оптически связанный через первый объектив 6 ($f \geq 10\text{мм}$; $D/f = 1$), микроотверстие (7) отражателя (8), второй объектив 9 ($f \geq 20\text{мм}$; $D/f = 1$) и широкоапертурный резонатор (4) с входом матрицы термочувствительных микрорезонаторов (3) для видимого излучения, которая дополнительно оптически связана через второй объектив (9), отражатель (8), сглаживающий пространственный светофильтр (10) с фотоприемной камерой (11).

В качестве источника ИК-излучения (1) может применяться абсолютно черное тело (АЧТ). ИК объектив (2) может быть выполнен в виде положительной германиевой линзы прозрачной в ИК области спектра, либо в виде сферического или параболического алюминиевого зеркала. Матрица термочувствительных микрорезонаторов (3) выполнена в виде 2-х координатной структуры пленочных микрорезонаторов Фабри-Перо, помещенной в вакуум между двумя окнами, одно из которых прозрачно для ИК-излучения, второе – для видимого излучения. Широкоапертурный резонатор (4) выполнен в виде пленочного резонатора Фабри-Перо, помещенного в вакуум между двумя окнами прозрачными для видимого излучения. Источник излучения видимой области спектра (5) выполнен в виде полупроводникового светодиода (максимум излучения при $\lambda = 525\text{нм}$, полуширина спектра $\Delta\lambda = 80\text{нм}$) с блоком питания и фокусировкой в оптоволокно. Первый объектив (6) и второй объектив (9) выполнены в виде положительных линз из стекла К8. Отражатель (8) с микроотверстием (7) выполнен в виде плоскопараллельной пластины из стекла К8 с отражающим покрытием для излучения в видимой области спектра, в котором сформировано отверстие для прохождения сфокусированного светового пучка. Сглаживающий пространственный светофильтр (10) должен быть выполнен в виде плоскопараллельной пластины из стекла К8 с нанесенным пленочным покрытием, обладающим изменяющимся по апертуре коэффициентом пропускания, который выполнен при помощи фотолитографии. 11 – фотоприемная камера, например HD-CVI

(марки Alhva DH-HAC-HF3220EP), сигнал от которой передается на дисплей.

При постоянной рабочей частоте модулятора изменение разности начальных температур матрицы термооптического преобразователя и широкоапертурного резонатора будет приводить в конечном итоге к изменению величины переменного сигнала на осциллографе, что позволяет определить разность начальных температур ΔT , которой соответствует максимальная чувствительность термооптического преобразователя при фиксированной температуре окружающей среды T_0 . Уменьшение величины интенсивности ИК-излучения позволяет определить обнаружительную способность термооптического преобразователя. При воздействии на термооптического преобразователя периодических импульсов ИК-излучения (синусоидальной или прямоугольной формы) с постоянной амплитудой, формируемых за счет увеличения рабочей частоты модулятора, происходит уменьшение его чувствительности. Это позволяет определить постоянную времени

$\tau = 1/2\pi\nu_c$. Граничная частота ν_c соответствует спаду чувствительности на 3 дБ при увеличении частоты модуляции.

Заключение. В итоге на основании ГОСТ Р 59606–2021 была разработана оптическая схема лабораторного стенда для исследования основных параметров матричных термооптических преобразователей: обнаружительная способность, температурное разрешение и постоянная времени.

Литература

1. Перспективы применения микрорезонаторов Фабри-Перо для тепловизионной техники / В. М. Кравченко [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 280–286.
2. Исследование матрицы Фабри-Перо термооптического преобразователя / В. М. Кравченко [и др.] // Восьмой белорусский космический конгресс, 25–27 октября 2022 года, Минск: материалы конгресса: в 2 т. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2022. – Т.2. – С.130–133.
3. ГОСТ Р 59606–2021. Оптика и фотоника. Устройства фотоприемные второго и последующих поколений. Методы измерений фотоэлектрических параметров и определения характеристик. – М: БелГИСС, 2021. – 2021.

УДК 620.179

ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТВЕРДОСТИ ЧУГУНА

Крень А. П.¹, Кутепов А. Ю.¹, Никифоров А. В.², Турсунов Н. К.³, Уразбаев Т. Т.³

¹ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

²Белорусский государственный университет

Минск, Республика Беларусь,

³Ташкентский государственный транспортный университет

Ташкент, Узбекистан

Аннотация Показаны возможности использования машинного обучения и стандартных библиотек языка программирования Python для оценки твердости чугунов различных марок, имеющих переменный модуль упругости. Установлено, что в случае применения метода микроударного индентирования это позволяет снизить погрешность до 10 единиц твердости по шкале Бринелля и отказаться от индивидуальных градуировок для различных чугунов при использовании портативных твердомеров.

Ключевые слова: твердость, модуль упругости, температура, металл, микроударное индентирование.

APPLICATION OF MACHINE LEARNING FOR CAST IRON HARDNESS CONTROL

Kren A.¹, Kutsepau A.¹, Nikiforov A.², Tursunov N.³, Urazbaev T.³

¹Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus

²Belarusian State University

Minsk, Republic of Belarus

³Tashkent State University of Transport

Tashkent, Uzbekistan

Abstract. The possibilities of using machine learning and existing libraries of the Python programming language for assessing the hardness of cast irons of various grades with a variable modulus of elasticity are shown. It was established that in case of application of the microimpact indentation method this allows to reduce the error to 10 units of hardness on the Brinell scale and to refuse individual scaling for different cast irons when using portable hardness testers.

Keywords: hardness, elastic modulus, temperature, metal, micro-impact indentation.

Адрес для переписки: Крень А. П., ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Республика Беларусь

e-mail: alekspk@iaph.bas-net.by

Чугун широко используется в машиностроении благодаря высоким механическим характеристикам и простоте выплавки. Одним из наиболее перспективных методов контроля механических характеристик является метод динамического ин-

струментального индентирования. Он подразумевает регистрацию всей диаграммы нагружения, когда индентор находится в контакте с испытуемым материалом. Эта диаграмма позволяет определить целый набор данных [1] и рассчитать динамиче-

скую твердость H_d . Однако, как показывают исследования, значение H_d плохо коррелирует со статической твердостью.

Целью данной работы является изучение возможности контроля твердости по Бринеллю H_B чугуна методом ударного микроиндентирования с использованием диаграммы нагружения материала и обработки данных с помощью такого инструмента искусственного интеллекта [2] как машинное обучение.

Данные для машинного обучения были получены с помощью прибора ИФМХ-Ч [3] с тремя датчиками, которые отличались между собой массой, радиусом и скоростью подлета индентора. Измерения проводились на 79 образцах чугуна: высокопрочном, сером, передельном, с вермикулярным графитом. В качестве признаков использовались следующие величины: максимальное усилие P_{max} , максимальная глубина внедрения h_{max} , глубина отпечатка h_p , упругая составляющая глубины вдавливания индентора h_e , контактный диаметр d_c , энергия упругого деформирования W_y , модуль упругости E , динамическая твердость H_d , скорость отскока индентора v_{min} , время активного этапа удара t_a , коэффициент восстановления скорости e , пластичность δ .

Для создания, выбора и обучения моделей был использован язык программирования Python. Помимо признаков, перечисленных выше, часть моделей была реализована с использованием полиномиальных признаков, которые получают из дополнительных признаков, формируемых путем различных математических операций.

Для каждого датчика обучение выполнялось индивидуально. Все этапы автоматизированной обработки данных осуществлялись с использованием библиотеки PyCaret. Сравнительный анализ моделей проводился на основе таких метрик, как MAE (средняя абсолютная ошибка), MSE (среднеквадратичная ошибка), RMSE (корень среднеквадратичной ошибки), R^2 (коэффициент детерминации), RMSLE (среднеквадратичная логарифмическая ошибка), MAPE (средняя абсолютная процентная ошибка) и TT (время обучения). В результате сравнения ряда моделей, оптимальной оказалась линейная регрессия.

В результате оптимизации, наименьшее значение $MAE = 13,3$ и наибольшее $R^2 = 0,924$ были получены при использовании следующих шести признаков: P_{max} , h_p , d_c , v_{min} , δ , e . Из рисунка 1 видно, что невязка – разница между измеренной и предсказанной моделью твердостью ΔH_B – не зависит от значения абсолютного значения H_B .

С целью возможного улучшения точности модели были сконструированы дополнительные признаки (2 вариант обучения), а также полиномиальные признаки 2 степени, которые формировались из основных и дополнительных (3 вариант). Признаки были получены при помощи мо-

дуля PolynomialFeatures. Дополнительные и полиномиальные признаки генерировались на основании полного набора признаков. Стоит отметить, что разные дополнительные признаки были подобраны для разных датчиков. Это означает, что при создании дополнительных признаков для каждого отдельного датчика можно добиться некоторого улучшения точности модели.

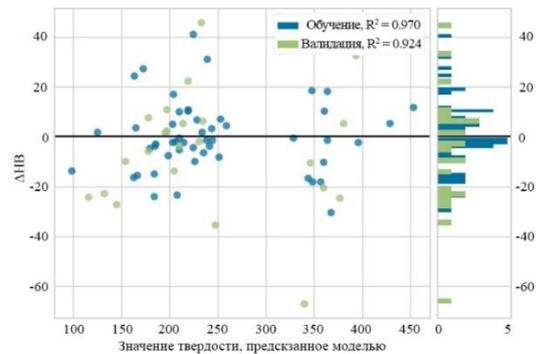


Рисунок 1 – Разница между измеренным и предсказанным значением твердости ΔH_B для модели, использующей линейную регрессию

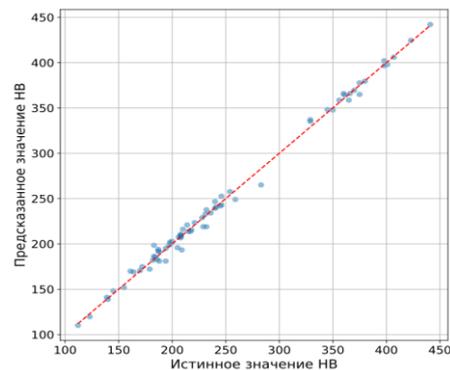


Рисунок 2 – График зависимости предсказанного значения H_B от истинного для модели с полиномиальными признаками

При обучении моделей с полиномиальными признаками с помощью библиотеки PyCaret оптимальное количество признаков для обучения повысилось до 13 (P_{max} , h_{max} , h_p , h_e , d_c , W_y , H_d , v_{min} , t_a , δ , e , $H_d^{1/2} \cdot h_{max}$, $v_{min} \cdot \log(e)$), из которых далее формировались полиномиальные 2 степени. На рисунке 2 представлен график зависимости предсказанного значения от истинного. Как можно заметить, для модели с полиномиальными признаками не свойственны наличие выбросов, нелинейность в предсказании, сильное смещение.

Для анализа и сравнения линейной и полиномиальной моделей был использован двухсторонний критерий Колмогорова-Смирнова. Рассчитанное значение величины D составило 0,42, а значение P составило менее 0,0001. Как результат, можно заключить, что выборки, полученные при помощи данных моделей, являются статистически различными, причем стандартное отклоне-

ние выборки, полученной при помощи модели с полиномиальными признаками меньше, чем в случае линейной модели – 4,48 против 10,48 соответственно. Аналогичный результат наблюдается и для выборки, полученной при помощи прибора, стандартное отклонение которой равно 12,51.

Таким образом, было показано, что использование инструментов машинного обучения с использованием библиотек языка Python для прогнозирования значений статической твердости по Бринеллю по данным динамического индентирования позволяет устранить грубые ошибки измерения и снизить погрешность косвенного определения твердости в 2 раза и более. При этом в большинстве случаев эта погрешность не превышает 10 НВ, что является труднодостижимым результатом при использовании обычных эмпирических зависимостей между динамической и статической твердостью.

УДК 004.056.53

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ АКУСТИЧЕСКИХ СЕЙФОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ СМАРТФОНОВ ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОЙ АКТИВАЦИИ

Кудина А. В.¹, Франко Е. П.¹, Денскевич А. Д.¹, Есьман Г. А.²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены результаты расчетов комплексных показателей качества акустических сейфов. Показана диаграмма распределения этих показателей, позволяющая выбрать наиболее оптимальную модель акустического сейфа для смартфона.

Ключевые слова: защита информации, акустические сейфы, технические параметры, комплексные показатели качества.

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE FUNCTIONAL PROPERTIES OF ACOUSTIC SAFES TO PROTECT SMARTPHONES FROM UNAUTHORIZED ACTIVATION

Kudina A.¹, Franko E.¹, Dzenskevich A.¹, Esman G.²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The results of calculations of complex quality indicators of acoustic safes are presented. A diagram of the distribution of these indicators is shown, which allows you to choose the most optimal model of an acoustic safe for a smartphone.

Key words: information protection, acoustic safes, technical parameters, comprehensive quality indicators.

Адрес для переписки: Денскевич А. Д., ул. Барыкина, 95, г. Червень 223232, Республика Беларусь
e-mail: denskevichad@gmail.com

Введение. Акустические сейфы являются сложными техническими средствами, предназначенными для защиты информации по акустическим каналам и создания защищенной зоны. Применяя направленные акустические волны, они подавляют звуковые колебания и предотвращают несанкционированное прослушивание смартфонов. Основой их работы служат передовые алгоритмы и технологии звуковой обработки, позволяющие фильтровать нежелательные аудиосигналы.

В настоящее время на рынке представлено множество моделей таких сейфов, что затрудняет выбор

Благодарности. Работа выполнена при поддержке БРФФИ. Проект T23УЗБ-035.

Литература

1. Rudnitsky, V. A., Determining yield strength of metals by microindentation with a spherical tip / V. A. Rudnitsky, A. P. Kren, G. A. Lantsman // Russian Federation Journal of Nondestructive Testing. – 2019. – V. 55, – P. 162–168.
2. Ben Chaabene, W. Machine learning prediction of mechanical properties of concrete: Critical review / W. Ben Chaabene Construction and Building Materials. – 2020. – T. 260. Elsevier BV. – P. 119889.
3. Крень, А. П. Контроль физико-механических характеристик чугуна прибором ИФМХ-Ч / А. П. Крень, В. А. Рудницкий, Г. А. Ланцман. // Литье и металлургия. – 2019. – №3. – С. 65–69.

$$K_{\text{ариф}} = \sum_{i=1}^m \alpha_{\text{Н}i} k_{\text{Н}i}, \quad (1)$$

где $k_{\text{Н}i}$ – нормированный i -й единичный показатель; $\alpha_{\text{Н}i}$ – нормированный коэффициент, характеризующий вес (значимость, важность) i -го единичного показателя; m – количество единичных показателей, принятых во внимание.

Поскольку технические параметры акустических сейфов представлены в различных размерностях, для корректного применения формулы (1) требуется их приведение к безразмерным величинам путем нормировки. Нормировка осуществляется на основании соответствующего выражения

$$K_{\text{Н}i} = \frac{k_i - k_{\text{кр}i}}{k_{\text{опт}i} - k_{\text{кр}i}}, \quad (2)$$

где k_i – исходное значение i -го единичного показателя; $k_{\text{кр}i}$ – критическое значение i -го единичного показателя; $k_{\text{опт}i}$ – оптимальное значение i -го показателя; $k_{\text{макс}i}$ – максимальное значение i -го показателя; $k_{\text{мин}i}$ – минимальное значение i -го показателя.

Исходные значения k_i должны лежать в пределах $k_{\text{кр}i} < k_i < k_{\text{опт}i}$ или $k_{\text{опт}i} < k_i < k_{\text{кр}i}$. Коэффициенты значимости $\alpha_{\text{Н}i}$ для формулы (1) должны выбираться таким образом, чтобы обеспечивалось условие

$$\sum_{i=1}^m \alpha_{\text{Н}i} = 1, \quad (3)$$

тогда нормированные значения $K_{\text{Н}i}$ будут лежать в пределах $0 < K_{\text{Н}i} < 1$.

В качестве единичных показателей для акустических сейфов были выбраны следующие технические параметры: стоимость, уровень шума, эффективность шумового спектра, продолжительность непрерывной работы, габариты устройства, масса устройства, рабочее напряжение, размер отсека для хранения смартфонов, а также максимальное количество защищаемых смартфонов. Для сравнительного анализа было отобрано 37 моделей акустических сейфов различных производителей.

Для вычисления числовых значений комплексных показателей качества акустических сейфов требуется предварительная подготовка и трансформация исходных данных. Этот процесс включает:

- преобразование параметров, представленных несколькими числовыми значениями, в показатели, выраженные единым числовым значением;
- установление численных значений для параметров, данные по которым не найдены;
- присвоение параметрам коэффициентов значимости;
- выбор оптимальных и критических значений параметров для их нормировки;
- выполнение нормирования коэффициентов значимости.

После выполнения всех преобразований количество параметров увеличилось до 14.

Для присвоения параметрам коэффициентов значимости был использован экспресс-метод, основанный на разделении параметров на группы по важности, каждой из которых присваивались чис-

ловые диапазоны, равномерно распределенные друг относительно друга. Таким образом техническим характеристикам были выбраны значения от 1 до 10. Характеристикам были присвоены следующий приоритет: стоимость – 6, уровень шума – 8, эффективность шумового спектра – 9, продолжительность непрерывной работы – 6.5, габариты устройства – 7, масса устройства – 6, рабочее напряжение – 7.5, размер отсека для хранения смартфонов – 7.5 и максимальное количество смартфонов – 8 [4].

Результаты расчетов, проведенные по формуле (1) с учетом выражений (2) и (3), в виде столбиковой диаграммы (рисунок 1).

Результаты расчетов показали, что наилучшие значения комплексных показателей качества наблюдаются у модели ASU-20A (0,624), на втором месте расположена модель ЛАГ-105 (0,617), а третье место заняла модель Чаша-Люкс (0,601). Внешний вид данных моделей представлен на рисунке 2.

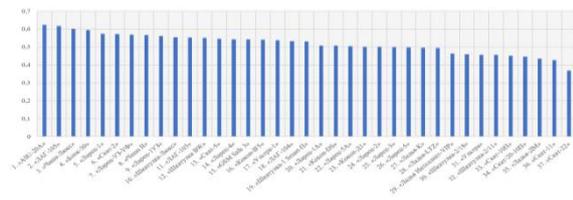


Рисунок 1 – Распределение комплексных показателей качества акустических сейфов



а – ASU-20A; б – ЛАГ-105; в – Чаша-Люкс

Рисунок 2 – акустические сейфы

Диаграмма демонстрирует три группы акустических сейфов с близкими значениями показателей внутри каждой группы и значительными различиями между группами: группа 1 (занимающая 1-3 места, с показателями от 0,624 до 0,601); группа 2 (4-19 места, с показателями от 0,595 до 0,530); группа 3 (20-37 места, с показателями от 0,508 до 0,368).

Заключение. Таким образом, комплексная оценка качественных характеристик акустических сейфов, ориентированная на обеспечение защиты смартфонов, позволила провести сравнительный анализ различных моделей. Учитывая технические параметры и их численные значения, удалось определить наилучшую модель акустического сейфа для защиты смартфонов от несанкционированного прослушивания, обеспечивая высокую безопасность данных.

Литература

1. Принципы действия и назначение акустических сейфов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.bargas.ru/info/articles/printsip_deystviya_i_naznachenie_akusticheskikh_seyfov/. – Дата доступа: 21.09.2024.

2. Алефиренко, В. М. Выбор состава технических средств для систем обеспечения безопасности / В. М. Алефиренко // Доклады БГУИР. – 2017. – № 2 (104). – С. 39–44.

3. Алефиренко, В. М. Комплексный анализ технических характеристик блокираторов сотовой связи и беспроводного доступа / В. М. Алефиренко, А. Д. Ден-

скевич, А. М. Асиненко // Журнал «Science Time»: Материалы Междунар. науч.-практ. мероприятий Общества Науки и Творчества за июнь 2022 года / Казань, 2022. – № 6 (102). – С. 5–9.

4. Акустические сейфы для защиты от перехвата конфиденциальной информации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://detsys.ru/catalog/zashchita_telefonov/. – Дата доступа: 21.09.2024.

УДК 004.9, 519.688

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРИПТОМОДУЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МИНИМАЛЬНО ИЗБЫТОЧНЫХ МОДУЛЯРНЫХ СИСТЕМ СЧИСЛЕНИЯ ДЛЯ ШИФРОВАНИЯ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Ломако А. А., Козлова Е. И.

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

Аннотация. На сегодняшний день одним из актуальных направлений в шифровании информации является использование модулярных систем счисления. В работе описываются минимально избыточные модулярные системы счисления и их применение для шифрования изображений, регистрируемых при дистанционном зондировании Земли. На основании экспериментальных вычислений выявлено, что скорость шифрования данных за счет использования параллельных вычислений повышается в 3,8 раза.

Ключевые слова: обработка изображений, параллельные вычисления, беспилотные летательные аппараты, модулярная арифметика.

THE CRYPTOMODULE WITH MINIMALLY REDUNDANT MODULAR NUMBER SYSTEMS EFFECTIVENESS FOR REMOTE SENSING DATA ENCRYPTING

Lamaka A., Kazlova A.

*A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. One of the most relevant directions in information encryption is the use of the mathematical apparatus of elliptic curves and modular number arithmetic systems. The paper describes minimally redundant modular number systems and their application to encrypt images recorded during remote sensing. It was revealed after the experimental calculations that the data encryption speed increases by 3.8 times due to the use of parallel computing.

Key words: image processing, parallel computing, unmanned aerial vehicles, modular arithmetic.

*Адрес для переписки: Ломако А. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: remsens@mail.ru*

В последнее время получили развитие исследования в области криптографии, направленные на согласование математического аппарата эллиптических кривых и арифметики модулярных систем счисления [1; 2]. Этот подход позволяет разрабатывать высокопроизводительные криптосистемы различного назначения [2]. Одной из областей применения такого криптомодуля может быть шифрование данных, получаемых при дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ). При этом шифрование может использоваться как для засекречивания данных космической съемки (в том числе, мульти- или гиперспектральных изображений), так и для обработки видеопотоков данных, передаваемых от беспилотных летательных аппаратов их операторам по радиоканалу. При этом использование особенностей модулярных вычислительных систем как архитектурно параллельных в совокупности с характерной для данных ДЗЗ целочисленностью значений в пикселях изображений позволяет существенно увеличить скорость обработки информации. Целью дан-

ного исследования стала численная оценка увеличения скорости шифрования изображений за счет использования параллельных вычислений.

Минимально избыточные модулярные системы счисления. Использование в различного рода числовых системах кодовой избыточности позволяет существенно улучшить арифметические и другие свойства таких систем. Для минимально избыточных модулярных систем счисления (МИМСС) отображение, описывающее кодирование, определяется следующим образом:

$$v: D \rightarrow Z_{m_1} \times Z_{m_2} \times \dots \times Z_{m_k}, \quad (1)$$

где m_1, m_2, \dots, m_k – модули МИМСС, D – кодируемое множество (прообраз кодового пространства), Z_{m_k} – диапазон таких целых чисел, что набору модулей m_1, m_2, \dots, m_k числа $X \in Z$ отвечает некий модулярный код $(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)$. При этом мощность диапазона D меньше, чем у диапазона $Z_{m_k}^-$ классической неизбыточной модулярной системы счисления с тем же базисом [2].

Главным преимуществом МИМСС по сравнению с неизбыточными модулярными системами счисления является значительное упрощение вычисления интервально-индексной характеристики за счет упрощения вычислительных процедур до тривиальных (одной модульной операции) при использовании табличной реализации [2].

Программный модуль шифрования. Для оценки эффективности разработан программный модуль (ПМ) шифрования RGB изображений (24 bit). В силу того, что для МИМСС при преобразовании одного целого числа требуется одна модульная операция, в ПМ в качестве операции пересчета значения интенсивности пикселя используется операция деления по модулю.

Управляющие устройства целевой нагрузки систем ДЗЗ, как правило, не обладают большими вычислительными мощностями, исходя из чего их возможности по шифрованию данных в реальном времени весьма ограничены. Одним из применяемых аппаратных решений может быть использование микрокомпьютеров Raspberry Pi, которые имеют до 4 ядер процессора (например, [3]). Это учитывалось при проведении анализа.

Анализ эффективности. Для оценки эффективности были использованы данные обзорной камеры беспилотного комплекса авиационного спектрометрирования [3]. Исходное разрешение изображений камеры составляет 1920×1080 пк. Производилось ресемплирование изображений с использованием билинейной интерполяции, в результате чего были сгенерированы 5 наборов изображений различного разрешения для анализа. Количество изображений в каждом из наборов данных равно 40. Разрешения изображений в различных наборах представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Пиксельные разрешения в наборах данных для анализа

Номер набора	5	4	3	2	1
Ширина, пк	2592	1920	1280	960	640
Высота, пк	1520	1080	720	540	360

Без использования параллельных вычислений скорость шифрования данных должна падать прямо пропорционально количеству пикселей в изображении. При использовании многопоточности технических средств, применяемых для расчетов, вычислительная эффективность будет увеличиваться при росте числа параллельно запущенных процессов. Однако количество потоков и скорость шифрования может изменяться не в прямой пропорциональности, так как в данном случае вероятно возникновение эффекта замедления вычислений в процессе слияния результатов расчетов в различных потоках в единое изображение. Тем не менее, этого замедления можно избежать за счет хранения данных о числовых значениях пикселей в последовательной области памяти. В таком случае при вычислениях можно передавать указатели на отдельные области памяти в каждый

поток для независимого шифрования. Результаты экспериментальной оценки среднего времени шифрования для групп изображений различного разрешения представлены на рисунке 1.

Как видно на рисунке 1, без применения многопоточности наблюдается ожидаемая линейная зависимость времени вычислений от количества пикселей в изображении. При этом использование параллельных вычислений позволяет существенно уменьшить время шифрования.

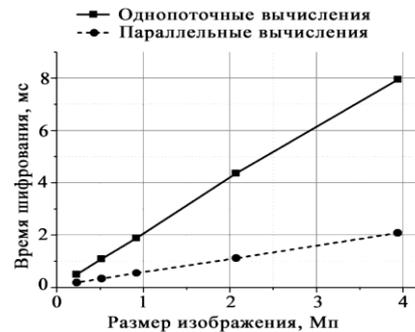


Рисунок 1 – Сравнительные графики зависимости среднего времени шифрования изображений от их разрешения

Так, например, для разрешения кадров 2592×1520 пк при использовании 4 вычислительных потоков среднее значение времени шифрования одного изображения уменьшается с величины 7,95 мс с СКО 0,06 мс до 2,08 мс с СКО 0,06 мс. Таким образом, за счет архитектурной возможности модулярных систем счисления по разбиению вычислений на независимые потоки возможно повышение скорости шифрования изображений до 3,8 раз.

Выводы. Анализ эффективности использования криптомодуля с применением МИМСС при шифровании данных ДЗЗ показал, что разработанный ПМ, использующий особенности модулярных вычислительных структур как архитектурно параллельных, позволяет в зависимости от разрешения изображений повысить скорость шифрования информации от 2,6 до 3,8 раз.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственной программы научных исследований «Цифровые и космические технологии, безопасность общества и государства» подпрограммы «Цифровые технологии и космическая информатика» по заданию 1.9.2 (№ государственной регистрации 20212656).

Литература

1. Инютин, С. А. Основы модулярной алгоритмики / С. А. Инютин. – Ханты-Мансийск : Полиграфист, 2009. – 347 с.
2. Червяков, Н. И. Модулярная арифметика и ее приложения в инфокоммуникационных технологиях / Н. И. Червяков [и др.]. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2017. – 400 с.
3. Lamaka, A. A. Photospectral Data Obtaining with the Unmanned Aerial Spectrometry Vehicle / A. A. Lamaka [et al.] // Devices and Methods of Measurements. – 2023. – V. 14, № 1. – P. 7–17.

УДК 004.046

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ SIEM СИСТЕМОЙ

Медведев Н. В.

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

Аннотация. Представлен подход к разработке методик проверки выполнения требований безопасности информации в SIEM-системах с учетом результатов разработки предложений по техническим требованиям к таким системам.

Ключевые слова: SIEM – система, требования безопасности, технологические требования, метрики испытаний.

ANALYSIS AND EVALUATION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF INFORMATION PROCESSING BY THE SIEM SYSTEM

Medvedev N.

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russian Federation

Abstract. An approach to the development of methods for verifying compliance with information security requirements in SIEM systems is presented, taking into account the results of the development of proposals for technical requirements for such systems.

Key words: SIEM system, safety requirements, technological requirements, test metrics.

Адрес для переписки: Медведев Н. В., ул. Вторая Бауманская, 5, г. Москва 107005, Российская Федерация
e-mail: medvedevnick54@yandex.ru

SIEM (Security information and event management) – объединение двух терминов, обозначающих область применения ПО: SIM (Security information management) – управление информационной безопасностью, и SEM (Security event management) – управление событиями безопасности. Технология SIEM обеспечивает анализ в реальном времени событий (тревог) безопасности, исходящих от сетевых устройств и приложений. SIEM представлено приложениями, приборами и сервисами, и используется также для журналирования данных и генерации отчетов в целях совместности с прочими бизнес-данными.

Оценка технологического процесса обработки информации SIEM системой в части противодействия несанкционированному доступу (НСД). В качестве субъектов доступа могут рассматриваться лица и процессы (программы пользователей), имеющие возможность доступа к объектам штатными средствами объекта ВТ. Субъекты доступа обязаны иметь официальное разрешение (допуск) к информации определенного уровня конфиденциальности.

Под штатными средствами доступа к информации SIEM системы на объекте информатизации понимаются общесистемные и прикладные аппаратные средства и программы, предоставляющие субъектам документированные возможности доступа к объектам доступа. Комиссия проверяет соответствие описания технологического процесса обработки и хранения конфиденциальной информации реальному процессу. Особое внимание уделяется выявлению возможностей

переноса информации большего уровня конфиденциальности на информационный носитель меньшего уровня [6].

Проводится анализ разрешенных и запрещенных связей между субъектами и объектами доступа с привязкой к конкретным СВТ и штатному персоналу, оценка их соответствия разрешительной системе доступа персонала к защищаемым ресурсам на всех этапах обработки.

Модели и метрики испытаний при проверке выполнения требований безопасности информации к SIEM системам. Методика испытаний SIEM системы на соответствие требованиям защиты информации от НСД уточняется на основании результатов анализа технологического процесса обработки информации в АС. Методика испытаний должна включать в себя перечень инструментальных средств, используемых при испытаниях и проверках данного объекта информатизации. Методика испытаний может дополняться, уточняться и корректироваться в процессе испытаний руководителем сертификационного органа по согласованию с заявителем.

При выполнении оценки соответствия по требованиям безопасности информации используются полуколичественные и количественные показатели. Полуколичественными показателями обычно выступают частные показатели, оцениваемые по некоторой бальной шкале. Например, при сертификационных испытаниях на соответствие традиционным РД используются частные показатели положительного результата проверок, принимающие значения, скажем, {0, 1}.

Количественные показатели могут принимать различные точные числовые значения. Примером использования таких показателей является проведение тематических исследований и сертификационных испытаний на соответствие ТУ, сертификационных испытаний по надежности обработки информации, обеспечению полноты, безошибочности, актуальности и защищенности информации в процессе функционирования информационных систем. Значения показателей могут быть, например, определены экспертным, регистрационным или расчетным путем.

В таблице 1 приведены примеры показателей качества, регламентированные национальными стандартами для программных и автоматизированных систем, к которым относятся и СИЕМ системы: ГОСТ 28195–89 «Оценка качества программных средств» и ГОСТ Р 50739-95 «Средства вычислительной техники. Защита от несанкционированного доступа к информации» [7].

Таблица 1 – Частные показатели «технологической безопасности» по ГОСТ 28195

Наименование	Метод оценки
Показатель устойчивости к искажающим воздействиям	$P(Y) = 1 - D/K$, где D – число экспериментов, в которых искажающие воздействия приводили к отказу; K – число экспериментов, в которых имитировались искажающие воздействия
Вероятность безотказной работы	$P = 1 - Q/N$, где Q – число зарегистрированных отказов, N – число экспериментов
Оценка по среднему времени восстановления	$Q_B = \begin{cases} 1, & \text{если } T_B \leq T_B^{\text{доп}} \\ T_B^{\text{доп}} / T_B, & \text{если } T_B > T_B^{\text{доп}} \end{cases}$ где $T_B = \frac{1}{N} \sum_i T_{B_i}$ – среднее время восстановления, где: N – число восстановлений; T_{B_i} – время восстановления после i -го отказа
Оценка по продолжительности преобразования входного набора данных в выходной	$Q_{\pi_i} = \begin{cases} 1, & \text{если } T_{\pi_i} \leq T_{\pi_i}^{\text{доп}} \\ T_{\pi_i}^{\text{доп}} / T_{\pi_i}, & \text{если } T_{\pi_i} > T_{\pi_i}^{\text{доп}} \end{cases}$ где T_{π_i} – допустимое время π_i преобразования i -го входного набора данных; π_i – фактическая продолжительность преобразования i -го входного набора данных

Следует отметить, что в области тестирования ПО измеряемые количественные частные показатели принято называть метриками. Это в полной мере относится и к СИЕМ системам [8].

Вывод. Метрики позволяют получить идентификационный профиль конкретных программ при статическом анализе. На практике это позволяет решить задачи аутентификации ПО, оценить сложность ПО, и, как следствие, уровень безошибочности программного проекта, трудоемкость анализа и доработок ПО, стоимость и сроки работ, эффективность технологии разработки и внедрения и др. Часто метрики являются параметрами моделей планирования испытаний [9].

Литература

1. Состояние и перспективы развития индустрии информационной безопасности Российской Федерации в 2011 г. / В. А. Матвеев [и др.] // Вестник МГТУ им. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2011. Спецвыпуск «Технические средства и системы защиты информации». – С. 3–6.
2. Нормативные и методические документы по технической защите информации. Специальные нормативные документы: официальный сайт ФСТЭК России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.fstec.ru/_razd/_karto.htm.
3. Специальные требования и рекомендации по технической защите информации (СТР-К). – Гостехкомиссия России. – Москва, 2001.
4. ГОСТ 28195. Оценка качества программных средств. – М.: Издательство стандартов, 1989.
5. ГОСТ Р 50739-95. Средства вычислительной техники. Защита от несанкционированного доступа к информации. – М.: Издательство стандартов, 1995.
6. Темнов О. Д. Анализ и исследование методов и средств обнаружения недеklarированных возможностей / О. Д. Темнов // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2007. – № 39. – С. 45–50.
7. Grusho, A. Strictly consistent tests for detection of statistical covert channels / A. Grusho, A. Knyazev, E. Timonina // Journal of Mathematical Sciences. – 2007. – Т. 146, № 4. – Р. 5984–5991.
8. Kostogryzov, A. Mathematical Models and Software Tools to Support an Assessment of Standard System Processes / A. Kostogryzov, G. Nistratov, N. Kleshchev // Proceedings of the 6th International SPICE Conference on Process Assessment and Improvement (SPICE-2006), Luxembourg, 2006. – Р. 63–68.

УДК 621.316.91; 537.39

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Мисюкевич Н. С.

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Обоснована необходимость определения температурно-временных характеристик кабельных изделий и описана методика экспериментального исследования.

Ключевые слова: время, кабель, температура, характеристика, электрический ток.

METHOD OF EXPERIMENTAL DETERMINATION OF TEMPERATURE-TIME CHARACTERISTICS OF CABLE PRODUCTS

Misiukevich M.

Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The need to determine the temperature-time characteristics of cable products is substantiated and the experimental research methodology is described.

Key words: time, cable, temperature, characteristic, electric current.

*Адрес для переписки: Мисюкевич Н. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: Misjukevitsch@mail.ru*

По данным многолетних исследований СТГФ Центра мировой пожарной статистики распространенной причиной пожаров в разных странах является тепловое проявление электрического тока [1]. При выборе параметров расцепителей аппаратов защиты электрических сетей учитываются условия нагрева кабельных изделий (кабелей, проводов, шнуров). Однако, методики выбора аппаратов защиты, как свидетельствует статистика, не предотвращают пожароопасного проявления электрического тока в кабельных изделиях. Условия выхода изоляции в пожароопасный режим при нагреве в результате теплового проявления электрического тока могут быть описаны температурно-временной характеристикой кабельных изделий. Она указывает на значение температуры проводника и изоляции в месте контакта с проводником в зависимости от времени протекания сверхтока и его значения, что может сопоставляться с тока-временной характеристикой аппаратов защиты.

Методика и экспериментальное оборудование используются для установления температуры на поверхности покрытых изоляцией электропроводников при прохождении через них сверхтока.

В ходе испытаний кабельной продукции во ВНИИПО МЧС Российской Федерации установлено, что места соединений кабельной продукции с оборудованием оказывают охлаждающее влияние на тепловой режим ее изоляции лишь на незначительном удалении от места соединения: не более трех диаметров токопроводящих жил.

На электропроводящие жилы кабельных изделий под изоляцию устанавливаем термоэлектрические преобразователи. Для получения массива данных в одном эксперименте на одну жилу устанавливаем не менее трех термоэлектрических

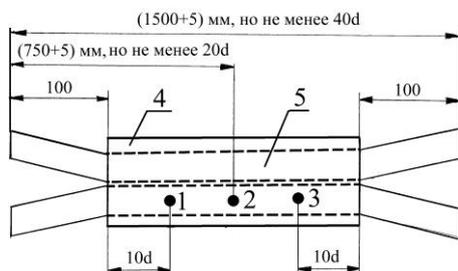
преобразователей. С учетом возможного охлаждающего действия в местах присоединения к оборудованию крайние термоэлектрические преобразователи устанавливаем на расстоянии примерно равному десяти диаметрам токопроводящей жилы. Остальные термопреобразователи устанавливаем на жиле равноудаленно между двумя крайними. Для уменьшения влияния на тепловые процессы изменения геометрических размеров кабельного изделия при установке термоэлектрических преобразователей изоляцию проводника прокалываем стержнем диаметром не более 2 мм до токопроводящей жилы на длину не менее 5 мм вдоль токопроводящей жилы и в образовавшееся отверстие вводим термоэлектрический преобразователь. Для образования качественного соединения прокол выполняем под острым углом. За счет упругих свойств изоляции отверстие герметизируется и термоэлектрический преобразователь плотно прижимается к жиле.

На рисунке 1 приведена схема расположения термоэлектрических преобразователей для проведения испытаний.

Испытания проводим на не менее чем трех образцах однотипной кабельной продукции длиной не менее сорока диаметров, но не менее $1,5 + 0,05$ м.

Если показания одного из термоэлектрических преобразователей отличаются от других более чем на 30 %, данные измерений этим термоэлектрическим преобразователем считаем недостоверными и не учитываем при обработке результатов. По результатам полученных измерений определяем среднеарифметические значения температуры в зависимости от значения сверхтока и времени испытаний, а также рассчитываем величину погрешности измерений.

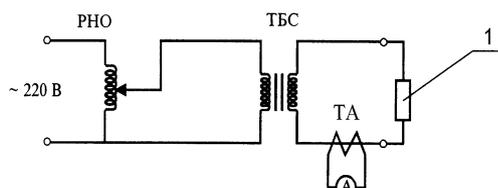
Для двухжильной кабельной продукции жилы на одном конце образца соединяем накоротко, а жилы на другом конце подключаем к соответствующим клеммам. Для многожильной кабельной продукции жилы на каждом из концов образца соединяем накоротко для равномерного распределения тока и подключаем концы к соответствующим клеммам для испытаний.



1, 2, 3 – термоэлектрические преобразователи;
4 – изоляция электропроводки;
5 – токопроводящая жила

Рисунок 1 – Схема расположения термоэлектрических преобразователей на испытываемом образце

Принципиальная схема установки представлена на рисунке 2.



1 – испытываемый образец кабельной продукции;
РНО – автотрансформатор; ТБС – источник
повышенного тока; ТА – трансформатор тока;
А – амперметр

Рисунок 2 – Принципиальная схема установки:

Соединение жил выполняем путем скручивания, применяя установочные или винтовые изделия.

Наиболее пожароопасный режим работы кабельных изделий соответствует отсутствию принудительного скоростного воздушного потока у поверхности образца. Обеспечиваем данный режим в помещении для испытаний. Отвод тепла от поверхности изоляции происходит только за счет конвективного теплообмена. Во время испытаний контролируем температуру окружающей среды. На результат испытаний могут оказывать влияние относительная влажность воздуха и изменения атмосферного давления. Однако, это влияние незначительно и находится в пределах относительной погрешности.

При проведении испытаний образец укладываем горизонтально на негорючее диэлектрическое основание. Кратковременное включение питания собранной схемы используем для установления режима испытаний. После установления необходимого значения тока путем регулировки источника повышенного тока подачу тока на об-

разец отключаем на время необходимое для охлаждения образца до температуры окружающей среды. После охлаждения проводим испытания, задавая значения сверхтока кратное номинальному. Для установки значения тока при испытаниях можно использовать образец кабельной продукции аналогичный испытываемому с последующим переподключением на испытываемый образец, что не потребует дополнительного времени на охлаждение образца до температуры окружающей среды. Испытания начинаем со значения сверхтока, соответствующего 1,2 допустимому ($I_{доп}$). В процессе испытания проводим регулировку источника повышенного тока для поддержания заданного значения с допустимым отклонением не более 2 %, так как значение тока изменится при нагреве образца.

Температуру контролируем с записью результатов через равные промежутки времени. Для снижения неопределенности измерений рекомендуется использовать запоминающее устройство.

Испытания проводим до предельно допустимой температуры нагрева в точках 1, 2, 3 (рисунок 1), или установившегося режима теплопередачи. Установившимся режимом теплопередачи считаем режим, при котором температура жил в течение десяти минут остается неизменной.

Испытания образцов последовательно проводим для токовых нагрузок от 1,2 $I_{доп}$ до 9,9 $I_{доп}$ с определением значения сверхтока, при котором предельно допустимая температура достигается менее чем за 30 с. Испытания для нового значения токовой нагрузки повторяем, увеличив значение сверхтока на 30 % относительно предыдущего значения. При этом по окончании каждого испытания испытуемый образец заменяем на новый. Если использованный образец во время испытаний остался неповрежденным, после его охлаждения до температуры окружающей среды он может быть использован в ходе следующего испытания при повышенном значении сверхтока.

Результаты испытаний используем для построения графика зависимости

$$t = f(I/I_{доп}), \quad (1)$$

где t – время достижения максимальной температуры при испытании.

Испытания проводим при любой температуре окружающей среды, а результат корректируем относительно контрольной температуры, как правило 30 °С, для возможности совмещения температурно-временной характеристики кабельного изделия и тока-временных характеристик аппаратов защиты.

Литература

1. Ежегодные отчеты CTIF [Электронный ресурс]. – Центр мировой пожарной статистики. – Режим доступа: <https://ctif.org/world-fire-statistics>. – Дата доступа: 30.09.2024.

УДК 681.2.08

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕРМО-ЭДС ТЕРМОПАР

Мороз А. С.¹, Фролов Н. Н.², Тявловский А. К.¹

¹Белорусский национальный технический университет

²ОАО «Фалькон групп»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данном докладе рассмотрены возможность применения линейной нейросети для компенсации дрейфа термоэлектродвижущей силы (термо-ЭДС) термопары типа ТХА (тип К). Компенсация изменения термо-ЭДС обеспечивается за счет подстроенных весовых коэффициентов линейной нейросети в блоке обработки нормирующим преобразователем сигналов термопары, но основании большой выборки измерений сравнения результатов измерения.

Ключевые слова: термопара, датчик, нейросеть.

THE USE OF NEURAL NETWORKS TO INCREASE THE ACCURACY OF MEASURING THERMAL EMF OF THERMOCOUPLES

Maroz A., Frolov N., Tyavlovsky K.

Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. In this report, the possibility of using a linear neural network to compensate for the drift of the thermoelectromotive force (thermo-EMF) of a thermocouple type TNA (type K) is considered. Compensation for changes in the temperature of the EMF is provided by adjusted weighting coefficients of the linear neural network in the processing unit with a normalizing converter of thermocouple signals, based on a large sample of measurements comparing the measurement results.

Key words: thermocouple, sensor, neural network.

Адрес для переписки: Мороз А. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: artur.moroz.97@mail.ru

Термопара хромель-алюмель ТХА (тип К) – самая распространенная в промышленности. В термопарах ТХА наблюдаются два вида нестабильности термо-ЭДС: необратимая нестабильность постепенно накапливающаяся со временем (длительная, кумулятивная), и обратимая нестабильность (циклическая, кратковременная), [1].

Необратимая нестабильность термопары типа ТХА в основном подвержена взаимодействию с окружающей средой. Особенно заметно изменение термо-ЭДС при работе термопар ТХА при температурах, начиная с ~600°C в течении ~1000 ч.

Стабильность в окислительных средах. При эксплуатации термопары типа ТХА на воздухе и в других окислительных средах (особенно с высоким содержанием кислорода) наблюдается необратимое возрастание ее термо-ЭДС. Только в некоторых случаях при 500°C наблюдается отсутствие дрейфа термо-ЭДС. Величина дрейфа термо-ЭДС растет с увеличением температуры и времени эксплуатации, график изменения представлены на рисунке 1, а [1].

Обратимая нестабильность термопары типа ТХА в основном обусловлена протеканием в хромеле превращений по типу ближнего упорядочения в интервале температур 250–550°C, [1], измерение представлено на рисунке 1, б.

Величина обратимого дрейфа зависит от предыдущей истории термоэлектродов, температур градуировки, скорости охлаждения, а также от градиента температурного поля в котором

находится термопара. Обратимый дрейф очень трудно отличить от необратимой нестабильности термо-ЭДС. При использовании классических методов измерения и нормализации значений термо-ЭДС, практически невозможно исключить обратимый дрейф (влияние порядка 3–5°C на конечный результат измерений), [2].

Исследования нестабильности термо-ЭДС и его дрейфа неоднократно подвергаются изучению, например, [3, 4].

Компенсация обратимых изменений термо-ЭДС термопары типа ТХА линейной нейросетью. Для заданной линейной сети и соответствующим множествам вектором входа и целей можно вычислить вектор выхода сети и сформировать разность между векторами выхода и целевым вектором, который определяет некоторую погрешность обучения.

Обратимые нестабильности термо-ЭДС термопар возможно компенсировать применением линейной нейросетью при обработке первичных измеренных данных до момента линейризации сигнала, чтобы исключить дополнительные ошибки.

Подобрав нужные весовые коэффициенты линейной нейросети для компенсации обратимой нестабильности, термо-ЭДС термопары. И прогнозируемых условиях были получены результаты сравнения отклонения разных образцов и граничных условий от эталонного полинома термопары типа ТХА результаты представлены на рисунке 1, б.

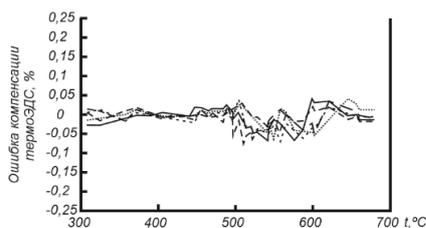


Рисунок 2 – Сравнение отклонения от эталонной градуировочной характеристики термопар хромель-алюмель (ТХА) при использовании линейной нейросети

По предварительным данным возможно полностью компенсировать обратимую нестабильность термоЭДС термопар типа ТХА в пределах 0,5 % от эталонной градуировочной характеристики.

Компенсация необратимой нестабильности термопары типа ТХА. Необратимые нестабильности термоЭДС термопары типа ТХА слишком подвержена зависимости от внешних условий эксплуатации, состав атмосферы, средняя температура работы и разбегка химического состава термоэлектродов. Исключает возможность использования нейросети для универсального применения – будет слишком большая разница от места применения и может возникнуть дополнительная погрешность измерения при сильном расхождении условий эксплуатации и условий, заложенных при обучении нейросети.

Применение новых методов компенсации нестабильности термо-ЭДС в частности примене-

ния нейросетей повышает точности и стабильность измерения температуры с использованием самых распространенных термопар типа ТХА, и позволяет на существующей базе обеспечивать компенсацию обратимых изменений температуры (в среднем исключает погрешность до $\sim 3\text{--}5^\circ\text{C}$).

Это позволяет добиться повышения надежности измерительной системы и увеличивает достоверность результатов измерений при длительной работе.

Литература

1. Рогельберг, И. Л. Сплавы для термопар. Справочник / И. Л. Рогельберг, В. М. Бейлин. – М., Металлургия, 1983. – 360 с.
2. Мороз, А. С. Повышение точности и надежности нормирующего преобразователя сигналов термопар = Improving the accuracy and reliability of the normalizing thermocouple signal converter / А. С. Мороз, А. К. Тявловский // Приборостроение–2021 : материалы 14-й Международной научно-технической конференции, 17-19 ноября 2021 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 114–116.
3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/109678>.
4. Hysteresis Effects and Strain-Induced Homogeneity Effects in Base Metal Thermocouples // Int J Thermophys. – 2015. – V. 36. – P. 467–481.
5. Keysight Technologies Практические советы по измерению температуры. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://keysight/pdf/093fb8fba015b56725bdd2bd540e7bf.pdf>.

УДК 539.622

ДЕМПФИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ МАЯТНИКА

Ризноокая Н. Н., Париза И. А., Красневский Д. Ю., Абдулазиз Абдуллах Каид А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Предложен способ стабилизации колебаний маятников в одной плоскости с помощью жидкостного демпфирования. Приведена схема расположения демпфирующих элементов. Произведена оценка влияния демпферов на измерения коэффициента сопротивления качению.

Ключевые слова: трение качения, предварительное смещение, маятниковый метод

DAMPING OF PENDULUM OSCILLATIONS

Riznookaya N., Pariza I., Krasnevski D., Abdulaziz Abdullah Qaid A.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A method for stabilizing pendulum oscillations in one plane using liquid damping is proposed. A diagram of the arrangement of damping elements is provided. The effect of dampers on measurements of the rolling resistance coefficient is assessed.

Key words: rolling friction, pre-displacement, pendulum method.

Адрес для переписки: Ризноокая Н. Н., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: Riznookaya@bntu.by

Маятниковый метод является одним из самых чувствительных методов измерения трения качения [1, 2]. Наиболее перспективным для эксплуатации является маятник с опорой на один шарик [1]. Однако наряду с чувствительностью данный маятник характеризуется и рядом недостатков.

Маятник с опорой на один шарик может совершать колебания в неограниченном количестве плоскостей, тем самым затрудняя измерения параметров колебаний данного устройства. Для измерений оптимальным является, когда маятник совершает колебания в одной плоскости. Этого можно

добиться с помощью определенного соотношения длин осей маятника и как следствие соотношения моментов инерции данного устройства [2].

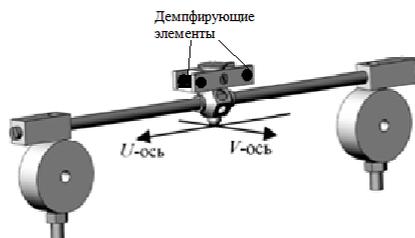


Рисунок 1 – Маятник с опорой на один шарик

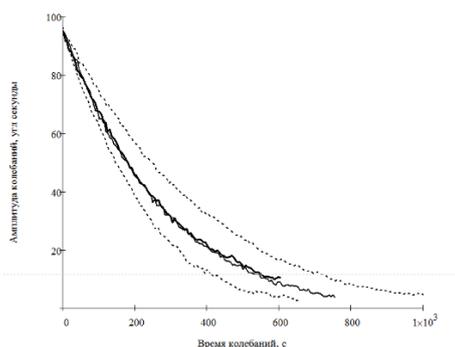


Рисунок 2 – Зависимости амплитуды колебаний от времени (--- с жидкостными демпферами, — без демпферов)

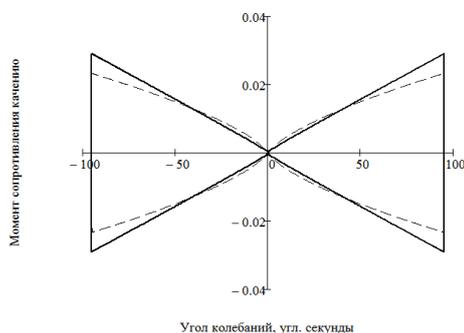


Рисунок 2 – Зависимость момента сопротивления качения от амплитуды для амплитуды 98 угловых секунд (--- с жидкостными демпферами, — без демпферов)

Сбалансированный маятник характеризуется нечувствительностью к вибрациям основания и колебаниям в заданной плоскости. Это справедливо для стационарного режима колебаний. При запуске маятник зачастую совершает колебания в плоскости перпендикулярной основным колебаниям.

Целью данных исследования являлось исследование метода жидкостного демпфирования для минимизации времени установления стационарных колебаний.

Конструкция маятника. Маятник имеет вытянутую форму, соотношение моментов инерции маятника не менее чем $I_u:I_v = 25:1$. Для демпфирования боковых колебания авторами было предложено использовать жидкость помещенную в одинаковые цилиндрические колбы. Колбы с жидкостью помещались максимально близко к центру масс, длинной стороной в направлении демпфируемых колебаний.

В идеальном случае, когда маятник совершает колебания без поперечных колебаний и нет шума, запись траектории движения луча лазера по матрице должна иметь форму прямой вертикальной линии. Однако реально траектория напоминает фигуру Лиссажу.

Результаты эксперимента. Исследования проводились с парой шарик пластина: сталь ШХ15 – стекло К8. Маятник имел массу 508 грамм.

В результате эксперимента было установлено, что использование жидкостных демпферов приводит к более быстрому затуханию поперечных колебаний. Однако наличие подобных демпферов приводит как к большему разбросу результатов измерений (рисунок 2), так и существенно оказывает влияние на момент сопротивления качения (рисунок 3).

Литература

1. I. Gilavdary, S. Mekid N.Riznookaya // Surface Topography: Metrology and Properties. – 2020. – V. 8, №. 3. – P. 035004.
2. Gilavdary, I. Phenomenological Laws of Single Point Contact: Pre-Rolling Contact Resistance through Pendulum / I. Gilavdary, S. Mekid, N. Riznookaya // Lubricants. – 2023. – Т. 11, №. 2. – С. 88.

УДК 681.518.5

ДИАГНОСТИКА ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОТОКОВ ДАННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА

Рябцев В. Н., Хейфец М. Л., Савеня П. С.

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрен вопрос о повышении уровня техногенной безопасности за счет использования систем автоматизированного мониторинга для выявления эксплуатационных повреждений и мест их расположения. Описаны перспективы развития автоматизированной диагностики в рамках концепции «Индустрия 4.0». Обоснована эффективность использования нейросетевых технологий для определения мест расположения поврежденных элементов конструкций.

Ключевые слова: техногенная безопасность, техническая диагностика, системы автоматизированного мониторинга, жизненный цикл, нейронные сети.

DAMAGE DIAGNOSIS BASED ON ANALYSIS OF AUTOMATED MONITORING SYSTEMS DATA FLOWS

Ryabtsev V., Kheifets M., Savenya P.

State scientific institution «Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus»
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Consideration has been given to improving the level of technological safety by using automated monitoring systems to identify operational damage and its location. The perspectives of development of automated diagnostics within the framework of «Industry 4.0» concept are described. The effectiveness of using neural network technologies to determine the location of damaged structural elements is demonstrated.

Keywords: technological safety, technical diagnostics, automated monitoring systems, life cycle, neural networks.

Адрес для переписки: Рябцев В. Н., ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: ryabtsev@iaph.bas-net.by

Обеспечение техногенной безопасности сложных инженерных конструкций и продление времени безотказной работы на протяжении всего их жизненного цикла приобретает особую актуальность по мере развития технического прогресса. Ключевым фактором в решении этой проблемы является своевременная диагностика эксплуатационных повреждений конструкций и изделий. Кроме того, своевременная диагностика позволяет существенно снизить затраты на обслуживание конструкций и систем. По данным [1], эксплуатация по техническому состоянию может принести выгоду, эквивалентную стоимости 30 % общего парка машин.

По мере развития электроники, компьютерных технологий и информатики появилась возможность контролировать работу конструкций и отдельных узлов сложных систем при помощи встроенных датчиков с последующей компьютерной обработкой потоков генерируемых ими данных. Дальнейшее развитие систем со встроенными датчиками идет в направлении создания киберфизических систем, в которых вычислительные ресурсы синергетически интегрированы в физическую компоненту системы. Эти системы являются одной из составляющих концепции «Индустрия 4.0», позволяющих вывести производство и обслуживание сложных технических систем на новый технологический уровень [2]. Однако, в настоящее время, системы непрерыв-

ного наблюдения пока ограничиваются размещением в сложной технической системе отдельных датчиков с системой автоматической сигнализации превышения пороговых значений контролируемых параметров.

Например, установка систем автоматизированного мониторинга (САМ) конструкций обязательна для высотных зданий, возможный ущерб от аварии которых чрезмерно велик. Типовая структура такой система показана на рисунке 1.



Рисунок 1 – Типовая структура системы автоматизированного мониторинга высотного здания

Эта и подобные ей структуры являются системами контроля, но не способны выявлять появляющиеся в конструкции эксплуатационные повре-

ждения. Вместе с тем, диагностические функции САМ оказываются совершенно необходимыми не только для диагностики в режиме реального времени, но и при создании в будущем цифровых двойников (*Digital Twins*) конструкций, также предусмотренных концепцией «Индустрия 4.0».

Стратегия идентификации повреждений в конструкциях различного типа с использованием средств автоматизированного мониторинга получила в зарубежной литературе название *SHM* (*Structural Health Monitoring*) [3]. Задачами *SHM* являются: выявление наличия повреждений, определение мест их расположения, определение типа повреждений и определение их масштаба. Решению задач *SHM* посвящены многочисленные исследования, однако окончательного решения проблемы до сих пор не найдено.

Главной проблемой автоматизированной диагностики повреждений в несущих конструкциях по данным сенсоров САМ является незначительный размер повреждений по сравнению с размерами всей конструкции. Вследствие этого появление повреждений мало влияет на динамический отклик всей конструкции. Для увеличения количества значимой для диагностики информации в потоке данных САМ предлагается анализировать не потоки данных от единичных сенсоров, а анализировать поток от системы синхронно работающих датчиков как единого целого.

Однако при таком подходе увеличивается также и общий объем исследуемой информации, а также усложняется структура данных.

Для решения задачи определения расположения участков с поврежденным элементом конструкции нами применялась технология классификации с использованием обучаемой полносвязной нейронной сети прямого распространения. Типовая схема такой сети приведена на рисунке 2.

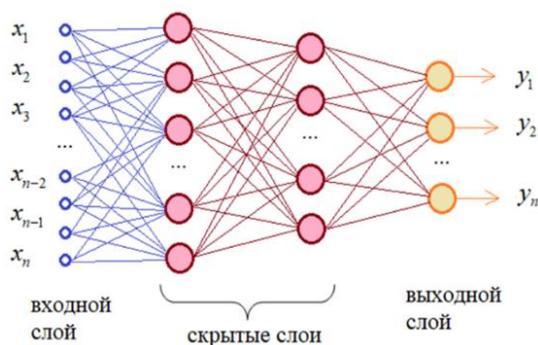


Рисунок 2 – Типовая схема полносвязной нейронной сети прямого распространения

Решение поставленной задачи, которая относится к классу обратных, достигается за счет использования обобщающей способности нейронных сетей.

Исходные данные для нейросетевого анализа потоков данных получены в результате компьютерного моделирования работы системы автоматизированного мониторинга при различных расположениях повреждений. Потоки данных были получены в результате динамических расчетов.

Для обучения нейронной сети использовалась выборка из 100 массивов данных при 6 вариантах расположения повреждений на каждом из участков. На вход нейронной сети подавались массивы данных из 2020 элементов каждый, полученные от 5 датчиков САМ, а на выходе получались вероятности расположения повреждения на одном из четырех участков.

Предварительно обученные нейросети позволили однозначно определить участок расположения повреждения по неизвестным сети тестовым сигналам датчиков.

Однако, существенным недостатком обучаемых нейронных сетей является большой объем обучающих выборок, требуемых для точной классификации объектов. Поэтому во многих случаях приходится принимать компромиссные решения, уменьшая количество участков в пользу сокращения объема обучающих выборок. Хотя количество разделяемых участков при этом сокращается, их количество оказывается достаточным для получения существенного эффекта в виде сведений об ориентировочном месте расположения повреждения.

Таким образом, можно утверждать, что задача определения места повреждения по сигналам системы датчиков может быть успешно решена за счет применения нейросетевых технологий.

Литература

1. Биргер, И. А. Техническая диагностика. Москва: Машиностроение, 1978. – 240 с.
2. Диагностика и мониторинг технического состояния на пути к ИНДУСТРИИ 4.0 / Н. Н. Ишин [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения. – 2018. – Т. 7. – С. 245–250.
3. Farrar, C. R. An introduction to structural health monitoring / C. R. Farrar, K. Worden // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2007. – V. 365, № 1851. – P. 303–315.
4. Рябцев, В. Н. Определение поврежденных элементов несущих конструкций здания с использованием нейронной сети / В. Н. Рябцев // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2022. – № 3. – С. 25–30.

УДК 621.396.6 : 004.94

КОМПОНОВКА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Савёлов П. И., Щавлев А. А.

*Государственное предприятие «НПЦ Многофункциональных беспилотных комплексов»
Национальной академии наук Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В данной работе определены основные задачи проектирования современных радиоэлектронных систем для обеспечения оптимальных тепловых режимов эксплуатации. При помощи САЕ модуля САПР SolidWorks проведены компьютерное моделирование по определению тепловых полей теплонагруженных блоков радиоэлектронной системы. Сформулированы основные принципы оптимизации компоновки радиоэлектронных систем.

Ключевые слова: радиоэлектронные системы, тепловые поля, оптимизация, компоновка.

ABOUT THE DESIGN OF RADIO-ELECTRONIC SYSTEMS TO IMPROVE OPTIMAL OPERATION CONDITIONS

Savelov P., Shchavlev A.

*State Enterprise «SPC of multifunctional unmanned systems»
NAS of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The article defines the main tasks of designing modern radio-electronic systems in order to ensure optimal thermal operation modes. Using the CAE module of SolidWorks CAD, computer modelling was carried out to determine the thermal fields of the heat-loaded blocks of the radio-electronic system. The basic principles of optimisation of layout of radio-electronic systems are formulated.

Key words: radio-electronic systems, thermal fields, optimization, configuration.

*Адрес для переписки: Савёлов П. И., ул. Купревича, 10/7, г. Минск 220141, Республика Беларусь
e-mail: i@savelov-1.ru*

Современная конкуренция среди производителей радиоэлектронной аппаратуры сейчас достигает высоких показателей. Основным способом конкурировать является уменьшение времени проектирования радиоэлектронной аппаратуры.

При разработке современных радио-электронных устройств, в особенности бортовых, сталкиваются с серьезными проблемами, основные из которых:

- повышение требований к надежности при усложнении условий эксплуатации;
- одновременное увеличение производительности, тепловой мощности и снижение массогабаритных параметров;
- необходимость сокращать сроки проектирования новых изделий.

Проектирование бортового оборудования новых беспилотных авиационных комплексов является модельно-ориентированным: конструирование и принятие технических решений проводится на основании разработки и анализа функциональных параметров твердотельных моделей деталей, узлов и беспилотных летательных аппаратов в целом, а также с учетом результатов компьютерного моделирования эксплуатационных характеристик разработанных изделий.

Сокращение трудоемкости конструкторских работ, сроков и себестоимости проектирования, изготовления и уменьшения затрат на эксплуата-

цию разработанных устройств невозможно без автоматизации конструкторских и научно-исследовательских работ при помощи систем автоматизированного проектирования. [1]

Современная радиоэлектронная аппаратура для удешевления производства все чаще состоит из отдельных блоков, с различными требованиями к условиям воздействия окружающей среды.

На этапе разработки робастных радиоэлектронных систем возникает необходимость системного изучения и отработки возможности функционирования системы и ее компонентов в рамках технического объекта, точное определение уровней внешних воздействий на систему, анализ оптимальных методов защиты от них и синтез проектных решений, обеспечивающих требуемую надежность функционирования системы.

В частности, проектирование современных систем включает решение следующих задач:

- выбор элементной базы с учетом требований к надежности и стойкости к режимам эксплуатации;
- обеспечение допустимых или улучшенных условий применения электронных компонентов при возможных отклонениях их параметров, режимов и внешних факторов;
- оптимизацию схемных и конструктивных решений с использованием методов математического и физического моделирования, основанными на критериях надежности и стойкости.

При проектировании бортовых электронных средств основной проблемой является их функционирование в сравнительно малых по объему защитных корпусах и наличия определенных тепловыделяющих мощностей. Это приводит к увеличению плотности выделяемой тепловой энергии и необходимости обеспечения ее рассеивания, как правило, в условиях пассивного охлаждения. Поэтому важной проблемой при разработке новых бортовых средств и их надежного функционирования является конструктивное обеспечение оптимального теплообмена с окружающей средой [2].

Основной проблемой, которую необходимо решать на этапе эскизного проектирования бортовой аппаратуры является взаимное влияние тепловых полей отдельных функциональных блоков.

Для интенсификации процесса проектирования новых радиоэлектронных систем и их оптимизации необходимо проведение моделирования тепловых полей отдельных блоков входящих в проектируемую систему с целью определения их абриса, площади и величины температур.

При помощи САЕ модуля САПР SolidWorks были проведены компьютерные исследования тепловых полей блоков самостоятельного функционального назначения. На рисунках 1 и 2 показаны конфигурации тепловых полей двух электронных блоков в защитном корпусе различной геометрии, имеющих различную величину тепловыделения (20 Вт) и конструктивные материалы несущих конструкций.

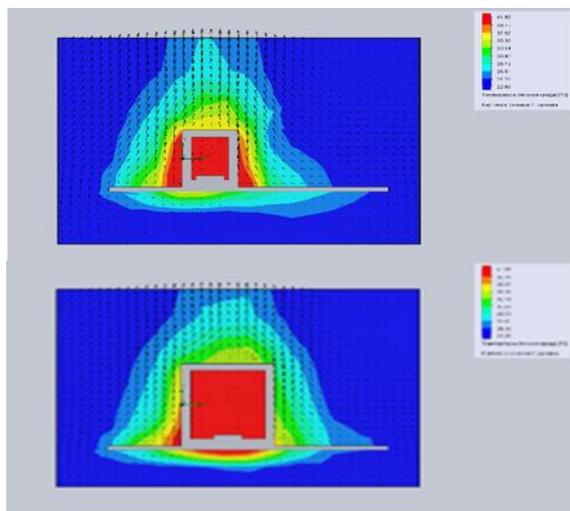


Рисунок 1 – Распределение тепловых полей электронных блоков. Материал защитного корпуса – АБС

Это позволяет установить границы взаимного влияния блоков, входящих в систему. При их применении в одном эксплуатационном объеме можно предварительно расположить их на достаточном удалении друг от друга основываясь на конфигурации тепловых полей, чтобы исключить

их взаимное влияние на величину температуры эксплуатации бортовых электронных систем.

Так же учитывая величину температуры тепловых полей позволяет оптимально размещать компоненты системы в эксплуатационном пространстве.

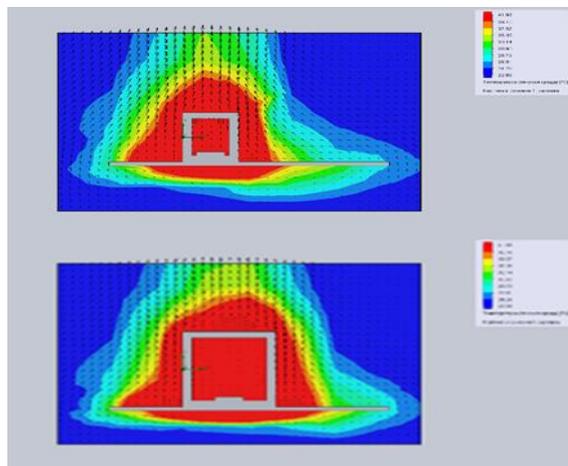


Рисунок 2 – Распределение тепловых полей электронных блоков. Материал защитного корпуса – сплав Д16

Проведенные исследования показали, что при функционировании бортовой электронной аппаратуры в условиях пассивного теплообмена, температурные поля, формирующиеся в окружающей среде, идентичны по абрису и площади. Но максимальная температура перегрева электронных компонентов, расположенных в устройстве с защитным корпусом из алюминиевого сплава Д16 ниже предельно допустимых значений.

Таким образом, предварительное компьютерные исследования конфигурации тепловых полей и определение возможного градиента температур окружающей среды на начальном этапе проектирования бортовой аппаратуры позволит оптимизировать компоновку авиационного оборудования уже на начальном этапе проектирования и минимизировать вероятность выработки ошибочных технических решений.

Литература

1. Савёлов, П. И. Применение САПР при проектировании беспилотных авиационных комплексов / П. И. Савёлов, А. А. Щавлев // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы XI международной научно-практической конференции – Минск, 2023. – С. 134–135.
2. Савёлов, П. И. Исследование пассивного теплообмена бортовой электронной аппаратуры / П. И. Савёлов, А. А. Щавлев, М.П. Невгень // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы VIII международной научно-практической конференции – Минск, 2023. – С. 136–137.

УДК 535.6.08 (004.932)

НОРМИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ В КОЛОРИМЕТРИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**Савкова Е. Н.***Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Представлена лабораторная технология установления нижних и верхних границ допускаемых значений в колориметрии цветowych изображений. Технология основана на тензорном исчислении.

Ключевые слова: цифровое изображение, координата цветности, тензор, цветовое пространство.

NORMALIZATION OF ACCURACY IN DIGITAL IMAGES COLORIMETRY**Saukova Y.***Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. AA laboratory technology for establishing the lower and upper limits of permissible values in colorimetry of color images is presented. The technology is based on tensor calculus.

Key words: digital image, chromaticity coordinate, tensor, color space.

*Адрес для переписки: Савкова Е. Н., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: savkova@bntu.by*

Измерение цвета заключается в идентификации его координат в выбранном цветовом пространстве с учетом положения точки «белого», характеризующей тип освещения. Точность определения цвета оценивается смещением центра тяжести геометрического места точек в цветовом пространстве или на графике цветностей в окрестности измеренного значения от опорного значения, а также рассеянием геометрического места точек. Таким образом, решения в колориметрии принимаются исходя из геометрического положения областей охвата (результатов измерений) по отношению к областям допусков. Чаще всего в области оценки соответствия используется аппаратно не зависимое цветовое пространство XYZ.

Метрологическая прослеживаемость опорного значения в колориметрии цифровых изображений обеспечивается путем построения условных многомерных виртуальных шкал со ссылкой на опорные значения координат цветности, наиболее точно воспроизводимые первичными эталонами, например, ГПСЭ РФ: для самосветящихся объектов с $U_p(x) = 0,00177 - 0,00299$, $U_p(y) = 0,00216 - 0,00324$. Вторичный эталон единиц координат цветности РФ воспроизводит опорное значение с суммарным от 0,0006 до 0,0010. Пределы допускаемых абсолютных погрешностей рабочих эталонов координат цветности самосветящихся объектов составляют 0,002–0,005 для Δx и Δy . Эталонные значения длин волн для описания оптических материалов, оптических систем и средств нормируются ISO 7944:1998. Национальный эталон координат цвета и спектральных коэффициентов направленного пропускания и диффузного отражения в диапазоне длин волн (0,2–2,5) мкм Республики Беларусь НЭ РБ 3-00 (<http://belgim.by>) воспроизводит опорное значение несамосветящихся объектов с расширенной

неопределенностью измерения: спектральных коэффициентов направленного пропускания – 0,12 %; спектральных коэффициентов диффузного отражения – 0,5 %; координат цвета прозрачных образцов – 0,10; координат цвета светоотражающих образцов – 0,25.

Нижние границы областей допусков предлагается устанавливать на основе дефиниционных неопределенностей, в качестве которых можно использовать следующие параметры:

1. Приведенные выше расширенные неопределенности и средние квадратические отклонения первичных, вторичных и рабочих эталонов;
2. Эллипсы Мак-Адама, характеризующие минимальные области цветоразличения или области цветовой однородности излучения [1];
3. Бины и оптибины, построенные на основе эллипсов Мак-Адама показанные на рисунке 1 [1], применяемые для контроля качества источников света (величина порога цветоразличения в цветовом пространстве XYZ составляет 0,0059).

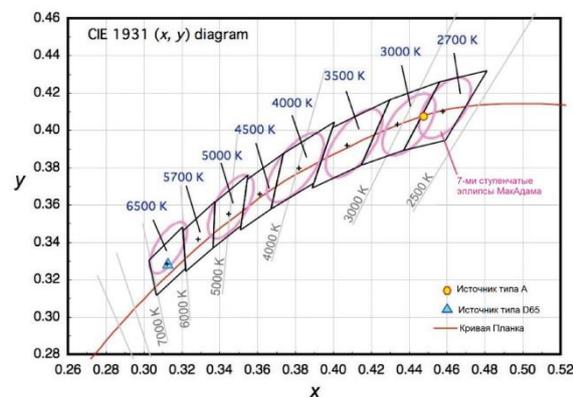


Рисунок 1 – 7-ступенчатые эллипсы МакАдама на цветовом графике МКО, 1931 г

4. Неопределенности определения значений зрительных L -, M -, S -рецепторов: для стимула Q со спектральным распределением света $P_\lambda(\lambda)$, его значения в LMS пространстве получают с точностью $L_Q(419,0 \pm 3,6 \text{ нм})$, $M_Q(530,8 \pm 3,6 \text{ нм})$ и $S_Q(558,4 \pm 5,2 \text{ нм})$. Бины и оптибины располагаются в центре графика цветностей, а удаленные от центра эллипсы МакАдама охватывают лишь его ограниченные области, что является существенным недостатком при принятии решений в измерениях. Данную проблему предлагается решить численными методами.

Верхние границы областей допусков предлагается устанавливать численными методами на основе тензорного исчисления цветового пространства. Для уменьшения неопределенности и рисков, возникающих в измерениях, предлагается установить дополнительные ограничители разделяющие цветовое пространство на сектора: по принципу превалирования удельных весов координат цвета (указаны в порядке убывания интенсивности цвета): 1) RGB; 2) RBG; 3) GRB; 4) GBR; 5) BRG; 6) BGR; цвета с одной переменной составляющей (указана на первой позиции) и двумя равными по удельным весам: 7) RG'B'; 8) GR'B'; 9) BR'G'; изохроматические цвета (только одна составляющая, остальные равны нулю) 10) RG₀B₀; 11) GR₀B₀; 12) BR₀G₀; цвета с одной переменной составляющей (указана на первой позиции) и двумя равными по удельным весам: 10) RG'B'; 11) GR'B'; 12) BR'G'; одна составляющая равна нулю: 13) RGB⁰; 14) RBG⁰; 15) GRB⁰; 16) GBR⁰; 17) BRG⁰; 18) BGR⁰ и так далее. Указанные сектора цветового пространства рассматриваются как наибольшие области допускаемых значений измеряемой величины. Группы точек в цветовом пространстве XYZ, соответствующие координатам цвета линеек образцов во всех их состояниях от начала координат до плоскости графика цветностей, представляют наборы виртуальных мер, описываемые векторными полями. График цветностей с нанесенными численными методами точками показан на рисунке 2.

Технология тензорного исчисления позволяет автоматизировать процесс принятия решений путем нормирования точности в цветовом пространстве и на плоскости графика цветностей. Если Ψ – номер сектора цветового пространства, j – номер реализации опорного образца, соответствующая времени экспозиции T_j , то проекция структурного цветового тензора на плоскость графика цветностей (цветового локуса) цветового пространства XYZ с применением принципа обозначений Эйнштейна могут быть записаны в виде:

$$G^\Psi = \left(\frac{\sum_{j=1}^m ((x^\Psi)^2 + (y^\Psi)^2 + (z^\Psi)^2)}{\prod_{j=1}^m x_j^\Psi + \prod_{j=1}^m y_j^\Psi + \prod_{j=1}^m z_j^\Psi} \times \frac{\prod_{j=1}^m x_j^\Psi + \prod_{j=1}^m y_j^\Psi + \prod_{j=1}^m z_j^\Psi}{\sum_{j=1}^m ((x^\Psi)^2 + (y^\Psi)^2 + (z^\Psi)^2)} \right) \quad (1)$$

Пусть поверхность для уровня интенсивности, соответствующего времени экспозиции T , задается плоскостью Ω_T , в данном случае – для T_1, T_2 и $T_3 - \Omega_1, \Omega_2$ и Ω_3 , лежащих на оси Z цветового пространства XYZ на отрезках $1/m_1, 1/m_2$ и $1/m_3$. Тогда для векторного поля $B_k = (X_k^T Y_k^T Z_k^T)$ нормальный вектор к плоскости Ω_T будет $r = (0, 0, 1/g)$. Для плоскости графика цветностей $r = (0, 0, 1)$. Поток векторного поля через поверхность Ω , описывающий расхождение векторного поля от начала координат до заданной плоскости, можно рассчитать с помощью поверхностного интеграла:

$$\Phi = \iint_{\Omega} B_k dB^T, \quad (2)$$

где B_k – векторное поле образца B_k ; dB^T – векторный элемент поверхности, равен произведению скалярного элемента поверхности db^T единичного нормального вектора r к поверхности. С учетом наибольших (x_{max}, y_{max}) и наименьших (x_{min}, y_{min}) значений координат цветности (после исключения выбросов) без учета поворота осей получим:

$$S = \pi(x_{max} - x_{min})(y_{max} - y_{min}). \quad (3)$$

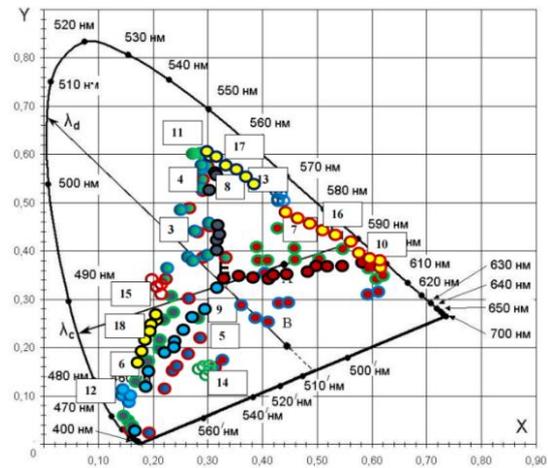


Рисунок 2 – Разделение цветового пространства на сектора

Литература

1. Будаков, В. П. Преобразования эллипсов МакАдама в широком диапазоне яркостей / В. П. Будаков, Р. А. Делян // Материалы 33-й Междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению, 19–21 сентября 2023 г., Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, Российская Федерация. – С. 250–255.

УДК 621.9.015, 620.184

ВЫЯВЛЕНИЕ СКРЫТЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОДЛОЖЕК МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДА КЕЛЬВИНА

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

¹Белорусский национальный технический университет
²ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Объектом исследования являлись алюминиевые подложки для создания сенсорных устройств на основе анодного оксида алюминия, прошедшие механическую обработку в виде шлифовки и рихтовки. Предметом исследования – выявление остаточных механических напряжений и иных дефектов поверхности для оценки качества данной обработки методом сканирующего зонда Кельвина. Показано, что данный метод позволяет эффективно выявлять остаточные пластические деформации алюминиевых подложек, являющиеся следствием их механической обработки с разрешением, достаточным для выявления механических напряжений, связанных с отдельными шероховатостями.

Ключевые слова: поверхность; контактная разность потенциалов; сканирующий зонд Кельвина; дефект; шероховатость.

DETECTING HIDDEN MECHANICAL DEFECTS OF ALUMINUM SUBSTRATES WITH A SCANNING KELVIN PROBE

Svistun A.¹, Zharin A.¹, Tyavlovsky A.¹, Pantsialeu K.¹, Mikitsevich U.¹,
Vorobey R.¹, Gusev O.¹, Tyavlovsky K.¹, Mukhurov N.²

¹Belarusian National Technical University
²SSPA "Optics, Optoelectronics, and Laser Technology"
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The object of the study was aluminum substrates for creating sensor devices based on anodic aluminum oxide, which underwent mechanical processing in the form of grinding and straightening. The subject of the study was the detection of residual mechanical stresses and other surface defects to assess the quality of this processing using the scanning Kelvin probe technique. The technique applied allows for the effective detection of residual plastic deformations of aluminum substrates resulting from their mechanical processing with a resolution sufficient to detect mechanical stresses associated with individual roughnesses.

Key words: surface, contact potential difference, scanning Kelvin probe, defect, roughness.

Адрес для переписки: Тявловский А. К., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

При создании сенсорных устройств на основе анодного оксида алюминия и других функциональных, в том числе наноструктурированных, материалов большую роль играет качество поверхности, на которой формируется анодный оксид. При этом финишная обработка поверхности, включая электрохимическое полирование, не исключает наличия невыявленных скрытых дефектов в виде остаточных пластических деформаций, создающих, вследствие своей неравномерности, механические напряжения в приповерхностных областях подложки. Такие напряжения являются локальными и их выявление требует картирования всей поверхности подложки, которое должно осуществляться неразрушающим бесконтактным методом вследствие высоких требований к чистоте поверхности для выращивания анодного оксида алюминия.

Этим требованиям удовлетворяет метод сканирующего зонда Кельвина, основанный на регистрации контактной разности потенциалов (КРП) между участком поверхности образца и чувстви-

тельным элементом электрометрического зонда, составляющими две обкладки динамического конденсатора [1]. Метод отличается исключительно высокой поверхностной чувствительностью, при этом выходной измерительный сигнал является многопараметрическим [2] и отражает параметры как химического (неоднородности состава, окисление, наличие адсорбированных веществ и загрязнений), так и механического (присутствие различных дефектов кристаллической решетки, кристаллографическая ориентация, наличие и знак механических напряжений и т. д.) состояния поверхности. В связи с этим для интерпретации визуализированного изображения пространственного распределения КРП требуется дополнительная информация об объекте измерений [3].

Объектом исследования в настоящей работе являлись алюминиевые подложки для создания сенсорных устройств на основе анодного оксида алюминия, прошедшие механическую обработку в виде шлифовки и рихтовки, предметом исследования – выявление остаточных механических

напряжений и иных дефектов поверхности для оценки качества данной обработки. Высокая химическая однородность материала пластин позволяла трактовать результаты сканирования в первую очередь как показатели механического состояния поверхности.

Исследуемые образцы характеризовались высокими значениями шероховатости поверхности с размером шероховатостей, достигавшим 200...400 мкм. Размер образцов составлял 60×60 мм. При этом отклонения от плоскостности составляли величину меньше высоты шероховатостей, что достигалось рихтовкой образцов после их шлифовки. Следует отметить, что величина выходного сигнала сканирующего зонда Кельвина практически не зависит от величины зазора зонд-образец, влияющего только на пространственную разрешающую способность зонда и соотношение сигнал/шум [4], что позволяло исключить интерпретацию особенностей пространственного распределения КРП на визуализированном изображении как геометрических отклонений формы поверхности. Для исследований использовался опытный образец установки неразрушающего сканирования прецизионных поверхностей, разработанный и используемый в НИЛ полупроводниковой техники БНТУ, и программное обеспечение собственной разработки.

Результаты исследований показали, что значения КРП не зависят от величины шероховатости поверхности и составляют в среднем 240 мВ в недеформированных областях всех исследованных образцов. При этом в области пластических деформаций после рихтовки для всех образцов имело место значительное понижение регистрируемых значений КРП до 40–80 мВ, что соответствует приращению относительных значений работы выхода электрона (РВЭ) на 160–200 мэВ. Типичной в этом отношении является карта пространственного распределения КРП алюминиевой подложки шероховатостью 200 мкм, приведенная на рисунке 1.

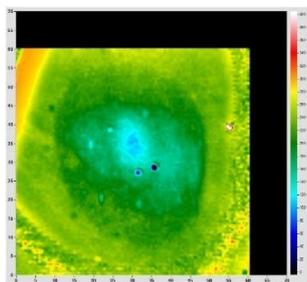


Рисунок 1 – Визуализированная карта распределения КРП поверхности алюминиевой подложки шероховатостью 200 мкм

На приведенном изображении прослеживается «ступенчатость» изменения значений КРП, соответствующая нескольким последовательным стадиям рихтовки. Кроме того, на карте распреде-

ления КРП наблюдаются локальные практические точечные области с резко отличающимися значениями КРП, что может быть отнесено на счет локальных загрязнений поверхности. Для наблюдения и анализа данных эффектов удобно использовать трехмерный вид представления пространственного распределения КРП, приведенный на рисунке 2. Характерные неровности (колебания) значений КРП с небольшой амплитудой и высокой пространственной частотой могут быть отнесены на счет разрешения сканирующим зондом отдельных шероховатостей, вершины и впадины которых также являются концентраторами механических напряжений. Вследствие этого потенциальный рельеф поверхности в определенной степени отражает геометрический рельеф шероховатостей.

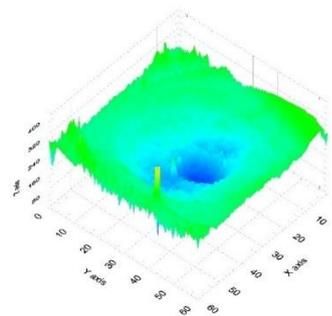


Рисунок 2 – Трехмерный вид распределения КРП поверхности алюминиевой подложки шероховатостью 200 мкм

Таким образом, метод сканирующего зонда Кельвина позволяет эффективно выявлять остаточные пластические деформации алюминиевых подложек, являющиеся следствием их механической обработки (рихтовки). При этом практически достигнутая пространственная разрешающая способность электрометрического зонда оказалась достаточной для разрешения отдельных шероховатостей, также являющихся микроконцентраторами механических напряжений.

Литература

1. Zharin, A. L. Contact Potential Difference Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping // Applied Scanning Probe Methods. – 2010. – V. 14. – P. 687–720.
2. Многопараметрические измерения электрического потенциала поверхности с использованием адаптивной односигнальной модели / К. Л. Тявловский [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2008. – № 2. – С. 27–32
3. Алгоритм неразрушающего контроля изделий с прецизионными поверхностями на основе методологии измерения параметров объектов с неопределенными состояниями / Р. И. Воробей [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2012. – № 2. – С. 29–36.
4. Тявловский, А. К. Математическое моделирование дистанционной зависимости разрешающей способности сканирующего зонда Кельвина // Приборы и методы измерений. – 2012. – № 1 (4). – С. 31–36.

УДК 53.082.55

ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ СВЧ-СИГНАЛА НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК С ВЫСОКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ХРОМАТИЧЕСКОЙ ДИСПЕРСИИ

Сидлеров Д. Ю., Микитчук К. Б., Чиж А. Л.

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной работе исследуется оптический метод измерения частоты СВЧ-сигнала в режиме реального времени на основе волоконных брэгговских решеток с высоким коэффициентом хроматической дисперсии. С помощью математического моделирования показана возможность измерения частоты СВЧ-сигнала в широком диапазоне от 2 до 20 ГГц с неопределенностью измерения менее 100 МГц.

Ключевые слова: измерение частоты СВЧ-сигналов, режим реального времени, волоконная брэгговская решетка, радиофотоника.

INSTANTANEOUS MICROWAVE FREQUENCY MEASUREMENT BASED ON FIBER BRAGG GRATINGS WITH HIGH CHROMATIC DISPERSION COEFFICIENT

Sidlerov D., Mikitchuk K., Chizh A.

SSPA «Optics, Optoelectronics and Laser Technology»
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. In this paper, an optical method for instantaneous microwave frequency measurement based on fiber Bragg gratings with high chromatic dispersion coefficient is presented. Using mathematical modeling, the possibility of measuring the microwave signal frequency in the wide range from 2 to 20 GHz with uncertainty less than 100 MHz is shown.

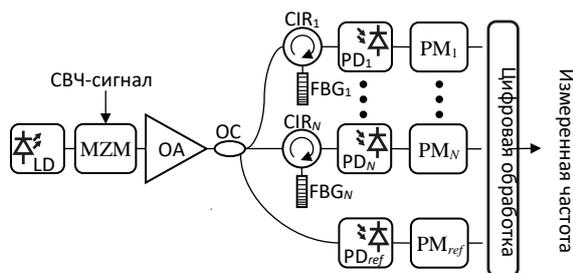
Keywords: instantaneous microwave frequency measurement, real-time measurement, fiber Bragg grating, microwave photonics.

Адрес для переписки: А. Л. Чиж, пр. Независимости, 68–1, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: chizh@oelt.basnet.by

Введение. В системах радиолокации и радиоэлектронной борьбы частота является одним из наиболее значимых параметров СВЧ-сигнала, позволяющим идентифицировать и классифицировать его источник. Анализ частоты СВЧ-сигналов в таких системах необходимо осуществлять в режиме реального времени и в широком диапазоне частот [1]. Радиотехнические системы измерения частоты СВЧ-сигналов обеспечивают малое время измерения (менее 1 мкс) и высокую точность, однако такие системы имеют узкий диапазон измеряемых частот. Быстрое измерение частоты в широком диапазоне частот осуществляется с помощью систем на основе многоканальной архитектуры, что приводит к увеличению стоимости и массогабаритных параметров таких устройств [2]. Применение оптических методов обработки СВЧ-сигналов в устройствах измерения частоты позволяет значительно расширить диапазон рабочих частот, а также упростить их архитектуру [3]. В данной работе исследуется метод измерения частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени на основе волоконных брэгговских решеток с высокой хроматической дисперсией.

Результаты и обсуждение. Измерение частоты СВЧ-сигналов в радиофотонных устройствах осуществляется путем ее преобразования в величину, поддающуюся измерению более простыми методами. Структурная схема радио-

фотонного устройства измерения частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени на основе брэгговских решеток с высоким коэффициентом хроматической дисперсии, осуществляющим преобразование «частота – СВЧ-мощность», показана на рисунке 1.



LD – лазерный диод; MZM – электрооптический модулятор Маха-Цендера; OA – оптический усилитель; OC – оптический разветвитель; CIR – оптический циркулятор; FBG – волоконная брэгговская решетка; PD – СВЧ-фотодиод; PM – датчик СВЧ-мощности

Рисунок 1 – Структурная схема радиофотонного устройства измерения частоты СВЧ-сигналов на основе волоконных брэгговских решеток с высоким коэффициентом хроматической дисперсии

В таком устройстве оптическая несущая, генерируемая лазерным диодом, поступает на вход электрооптического модулятора Маха-Цендера,

где модулируется по интенсивности СВЧ-сигналом, частоту которого нужно измерить. На выходе модулятора оптический сигнал сначала усиливается оптическим усилителем на легированном эрбием волокне, а затем разделяется оптическим разветвителем на N измерительных каналов и один опорный канал. Опорный канал содержит СВЧ-фотодиод, преобразующий оптический сигнал в СВЧ-сигнал и датчик СВЧ-мощности. Измерительные каналы дополнительно содержат на входе волоконную брэгговскую решетку, подключенную через оптический циркулятор. Волоконная брэгговская решетка с высоким коэффициентом хроматической дисперсии представляет собой фазовый фильтр, который вносит частотно-зависимый фазовый сдвиг в спектральные составляющие модулированного оптического сигнала, что приводит к частотно-зависимому изменению коэффициента передачи измерительного канала. В результате математического моделирования радиофотонного устройства, были получены частотные зависимости нормированных коэффициентов передачи в диапазоне частот 2–20 ГГц для измерительных каналов с разными значениями коэффициента хроматической дисперсии, представленные на рисунке 2. Таким образом, устанавливается детерминированная связь частоты исследуемого СВЧ-сигнала с СВЧ-мощностью на выходе измерительного канала, то есть реализуется преобразование «частота – СВЧ-мощность».

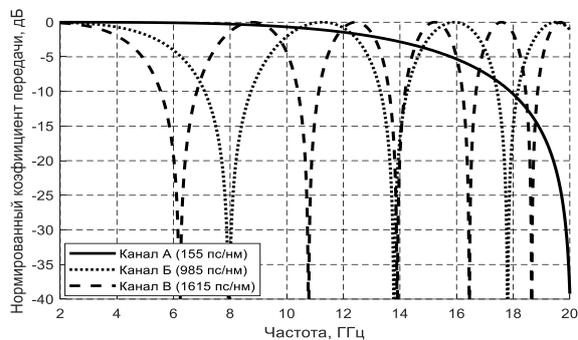


Рисунок 2 – Частотная зависимость нормированных коэффициентов передачи измерительных каналов с разными коэффициентами хроматической дисперсии волоконной брэгговской решетки

Измерение частоты исследуемого СВЧ-сигнала выполняется следующим образом. С помощью каждого измерительного канала определяется набор предполагаемых значений частоты, соответствующих измеренным в каналах величинам СВЧ-мощности. Совпадающее для всех каналов значение частоты выбирается в качестве результата измерения. Основной вклад в неопределенность измерения частоты на основе нормированных коэффициентов передачи вносит неопределенность измерения датчиков СВЧ-мощности. На рисунке 3 приведена неопределенность измере-

ния частоты с помощью радиофотонного устройства, рассчитанная в диапазоне частот от 2 до 20 ГГц для датчиков СВЧ-мощности с неопределенностью измерения 0.05, 0.1 и 0.2 дБ. Как следует из рисунка, неопределенность измерения СВЧ-мощности 0.1 дБ соответствует на частотах около 2 ГГц неопределенности измерения около 200 МГц и уменьшается до 25 МГц на частотах около 4 ГГц. Это объясняется малой крутизной частотной зависимости нормированных коэффициентов передачи измерительных каналов в начале данного участка (рисунок 2). При увеличении частоты крутизна частотной зависимости нормированного коэффициента передачи возрастает, вследствие чего снижается неопределенность измерения частоты. В диапазоне частот от 4 до 20 ГГц можно наблюдать участки, где неопределенность измерения частоты возрастает. Это происходит, когда один или несколько соответствующих нормированных коэффициентов передачи изменяются с высокой крутизной, а остальные с низкой.

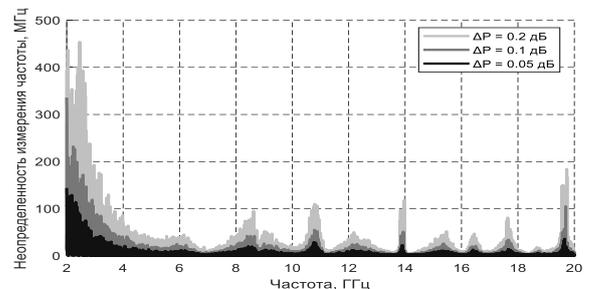


Рисунок 3 – Неопределенность измерения частоты с помощью радиофотонного устройства на основе волоконных брэгговских решеток, рассчитанная для различных неопределенностей измерения СВЧ-мощности

Заключение. В данной статье предложен метод измерения частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени на основе волоконных брэгговских решеток с высокой хроматической дисперсией и проведено ее математическое моделирование. Показано, что с помощью радиофотонных устройств на основе волоконных брэгговских решеток можно реализовать преобразование «частота – СВЧ-мощность» и измерять частоту СВЧ-сигнала в диапазоне от 2 до 20 ГГц с неопределенностью менее 100 МГц.

Литература

1. Broadband instantaneous multi-frequency measurement based on a Fourier domain mode-locked laser / B. Zhu [et al.] // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – 2021. – V. 69, № 10. – С. 4576–4583.
2. Егоров, Н. Мгновенное измерение частоты: методы и средства / Н. Егоров, В. Кочемасов // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2017, № 5. – С. 136–141.
3. Urlick V., Williams K., McKinney J. Fundamentals of microwave photonics. – John Wiley & Sons, 2015.

УДК 004.9:681.518.5

О ФОРМИРОВАНИИ ЭТАЛОНОВ РАСПОЗНАВАНИЯ СИГНАЛОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ДЕФЕКТАЦИИ С ПРИБОРАМИ МНОГОКАНАЛЬНОГО ВИБРОДИАГНОСТИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ МАШИН И АГРЕГАТОВ И ИХ УЗЛОВ

Ткаченко В. В., Филипеня О. Л., Храбров В. В.

*ГНУ «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрены пути повышения точности и достоверности приборного оценивания неисправностей в работе механизмов и узлов оборудования на основе предлагаемых аппаратных и программно-алгоритмических решений для экспертных систем вибродиагностирования.

Ключевые слова: вибродиагностика, спектральный анализ, распознающий эталон.

ON THE CREATION OF SIGNAL RECOGNITION REFERENCES FOR AUTOMATIC FAULT DETECTION OF MACHINES AND AGGREGATES, AND THEIR COMPONENTS USING DEVICES FOR MULTI CHANNEL VIBRATION DIAGNOSTICS

Tkachenko V., Filipenia O., Khrabrov V.

*United Institute of Informatics Problems of National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The ways based on the proposed hardware and software-algorithmic for expert vibration diagnostics systems solutions of improving the accuracy and reliability of the instrument evaluation of malfunctions in the operation of mechanisms and components of equipment are considered.

Key words: vibration diagnostics, spectral analysis, recognition reference.

*Адрес для переписки: Ткаченко В. В., ул. Сурганова, 6, г. Минск 220012, Республика Беларусь
e-mail: tkach@newman.bas-net.by*

Для контроля технического состояния производственного оборудования в процессе его эксплуатации, ремонта и обслуживания широко применяются приборы, предназначенные для автоматического выявления дефектов в работе механизмов и узлов оборудования, приводящих к изменению параметров их вибраций. При этом в качестве анализируемых параметров сигналов и вибрационных нагрузок в большинстве случаев выбираются характеристики во временной или спектральной области.

Примером такого подхода может служить экспертная система и программно-технический комплекс (ПТК) вибродиагностирования (рисунок 1) состояния оборудования: двигателей внутреннего сгорания, трансформаторов, электромоторов, компрессоров, подшипниковых опор и т. д. [1]. В организации работы с такой системой создается и используется база данных эталонных форм сигналов и их спектров, позволяющая автоматически выявлять дефекты заданных классов как в условиях его лабораторных испытаний, так и в «полевых» условиях работы оборудования с применением Интернет-коммуникаций. В данном примере база эталонных распознавания для дефектации создана с использованием пьезоэлектрических датчиков вибросигналов акустического диапазона и может быть расширена в части библиотечных эталонов по усмотрению пользователя системой в зависимости от типов и моделей тестируемого оборудования. К основным особенностям проектирования приборов такого класса относится циклический характер

рабочих режимов оборудования и возможность эффективного применения цифровых методов Фурье-анализа спектрального состава для выявления «искомых» составляющих спектра в заданном окне временного цикла.

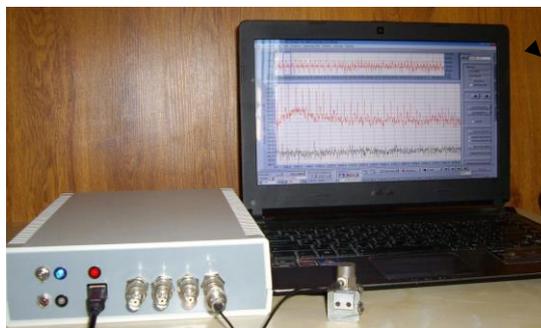


Рисунок 1 – Экспериментальный образец ПТК виброакустического диагностирования с видом пользовательского окна на экране для эксперта

В то же время достижение необходимой точности или достоверности распознавания дефектов требует при проектировании прибора особых мер повышения отношения сигнал/шум, к которым могут быть отнесены также меры адаптирующей корректировки эталонов распознавания применительно к конкретным условиям работы оборудования с высоким уровнем «посторонних» вибраций и медленным со временем изменением формы сигнала, в том числе дрейфа постоянной составляющей и аддитивного шум, на фоне которых выделение информативных признаков может

быть затруднено из-за близости значений оценок. Одним из способов снижения влияния шумов является формирование эталонов распознавания «картинного» типа в виде изображений.

Возможности получения и использования эталонов «картинного» типа представлены на рисунках 2 и 3 по результатам экспериментов с датчиками индукционного типа для контроля параметров вибраций. Датчики представляют собой катушки индуктивности, установленные на тестируемом оборудовании возле вала вращения, на оси которого закреплен постоянный магнит. Макетирование выполнено с двумя вариантами исполнения катушек, соосных с осью вращения: катушка в форме цилиндра, и торообразная катушка на кольцевом феррите.

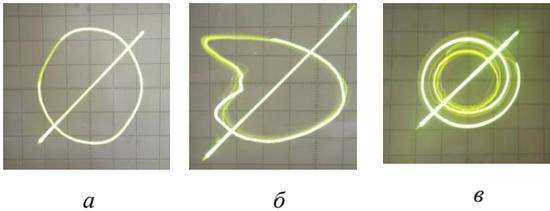


Рисунок 2 – Фазовые портреты осевых биений в установившихся режимах вращения внутреннего кольца подшипников: нового (а) и изношенного (б), и в переходном процессе с включени мотора (в)

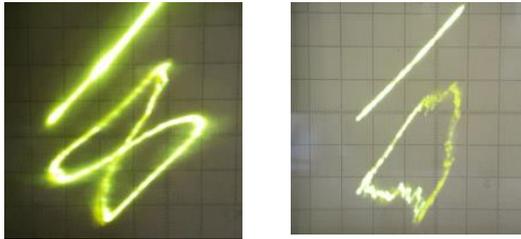


Рисунок 3 – Фазовые портреты осевых биений в установившихся режимах вращения вала электродвигателя с разной степенью износа

В первом варианте (рисунок 2) э.д.с. катушки непосредственно на осциллограмме отражает биения оси. Во втором варианте, токи наводимые в катушке, создают переменное магнитное поле, величина которого с четырех сторон тора снимается датчиками Холла (рисунок 3). Фазовые портреты, подобные фигурам Лиссажу, демонстрируются X-Y осциллограммами, формы которых меняются в зависимости от биений вала, связанных с неисправностями. Именно эти «картинки» и могут служить тестовыми и распознающими «паттернами» для выявления тех или иных дефектов без использования или в дополнение к спектральному анализу.

При этом, для обоих случаев анализа по фазовым портретам или спектрам, отсутствие динамической подстройки распознающих эталонов в соответствии с медленным дрейфом формы самих сигналов может привести к неправильному ре-

зультату распознавания. Для решения этой проблемы нами предложено введение в схему формирования эталонов распознавания корректирующего или оптимизирующего (средневзвешенного) эталона:

$$c = (1/M) \sum^m r, \quad (1)$$

где ${}^m r$ – распознающий эталон для класса m ($m = 1, 2, 3, \dots, M$), который можно определять как средневзвешенный вектор (M – количество отсчетов) в пределах действия его класса в виде:

$${}^m r = (1/b) \sum^m t \quad (2)$$

и перед оцениванием подвергать обработке по следующему правилу:

$$r_k = r^* - (r^*, c^*) c_i \quad \text{и} \quad a_k = a^* - (a^*, c^*) c, \quad (3)$$

где a_i – анализируемые выборки, представленные множествами отсчетов $k_i, k_i + 1, k_i + 2, \dots, k_i + A - 1$ из сигнала (i – порядковый номер распознаваемой выборки, A – количество отсчетов, анализируемых в процессе распознавания).

Формирование одно- и двумерных эталонов может выполняться по правилам [2], позволяющим учесть ранжирование обучающих выборок по приоритету, например:

$$r_j = r^*_{j-1} + j^{-1} (t_j^*, r_{j-1}^*) (t_j^* - r^*_{j-1}). \quad (4)$$

Тогда сама оценка осуществляется на текущем шаге обработки i -ой выборки сигнала по следующему правилу:

$$\varepsilon_k = (r_k^*, a_k^*) n^R / n^A, \quad (5)$$

где коэффициенты n^R и n^A представляют собой нормы векторов r_k^* , a_k^* с предыдущего шага.

Согласно формуле (3) алгоритм распознавания с оптимизирующей коррекцией представляет собой линейные преобразования, «вытягивающие» из распознающих эталонов и анализируемых сигналов полезную информацию с точки зрения различения состояний объекта в условиях действия посторонних вибраций и шумов.

Литература

1. Система виброакустической диагностики технического состояния производственного оборудования / Н. В. Грунтович [и др.] // Принттехнологии и медиакоммуникации : тезисы 84-й науч.-техн. конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 3–14 февраля 2020 г. – Минск : БГТУ, – 2020. – С. 20–21.
2. Храбров, В. В. Модель нейроподобной системы обработки сигналов в парадигме векторной психофизиологии / В. В. Храбров, В. В. Ткаченко // Big Data and Advanced Analytics: сборник научных статей VIII Международной научно-практической конференции, (Минск, 11–12 мая 2022 года), УО БГТУ. – Минск : Бестпринт, 2022 – С. 32–40.

УДК 621.9.015, 544.228

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ
ТВЕРДОСТИ И РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА С ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА**
Тявловский А. К., Тявловский К. Л., Жарин А. Л., Воробей Р. И., Гусев О. К., Пантелеев К. В.,
Борисенок С. В., Самарина А. В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Проведены исследования зависимости между твердостью поверхности стальных образцов и относительными значениями работы выхода электрона, измеряемыми по методу Кельвина-Зисмана. Для исследований использовался ряд однотипных образцов из стали 40X, закаленных на твердость от 25HRC до 48HRC. Результаты сопоставлялись с существующими математическими моделями, предполагающими наличие взаимосвязи между параметрами твердости и работы выхода электрона в виде степенной зависимости 6-й степени. Экспериментально показано, что твердость поверхности оказывает существенно меньшее влияние на работу выхода электрона, чем нарушения химического состава и коррозионный потенциал.

Ключевые слова: поверхность; твердость; модуль Юнга; работа выхода электрона; сканирующий зонд Кельвина.

**EXPERIMENTAL STUDY OF A FUNCTIONAL DEPENDENCE BETWEEN METAL'S SURFACE
HARDNESS AND WORK FUNCTION**

**Tyavlovsky A., Tyavlovsky K., Zharin A., Vorobey R., Gusev O.,
Pantsialeveu K., Borisyonok S., Samaryna A.**

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The dependence between steel samples' surface hardness and relative work function values measured with Kelvin-Ziesman technique was studied. The study used uniform samples of 40X steel hardened to 25HRC...48HRC. The results were compared with existing mathematical models that assume a power dependence of the 6th degree between the parameters of hardness and the work function. The experimental results prove that the influence of surface hardness on work function is much less than that of chemical composition variations and corrosion potential.

Key words: surface; hardness; Young's modulus; work function; scanning Kelvin probe.

*Адрес для переписки: Тявловский А. К., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: tyavlovsky@bntu.by*

Интерес к бесконтактным измерениям работы выхода электрона (РВЭ) с поверхности методом сканирующего зонда Кельвина для выявления и картирования дефектов поверхности изделий из металлов и сплавов определяется полностью неразрушающим (не воздействующим на поверхность) характером данного метода, простотой технической реализации картирования поверхности с практически любым требуемым пространственным разрешением и исключительно высокой чувствительностью РВЭ к физическим, и в частности механическим, параметрам поверхности. Различными авторами измеряемые сканирующим зондом Кельвина значения РВЭ связываются с модулем Юнга [1] или пределом текучести [2] металла, комплексно с модулем Юнга и твердостью [3], либо с коррозионным потенциалом поверхности [4]. В частности, на основе теоретических выкладок *G. Hua* и *D. Li* предложена математическая модель, численно связывающая РВЭ ϕ с модулем Юнга E [1] степенной зависимостью вида $E \sim \alpha \phi^6$, где α – постоянная Маделунга. Авторами указанной работы в качестве подтве-

ждения математической модели приводится зависимость модуля Юнга от табличных значений РВЭ для различных металлов (рисунок 1), при этом другие факторы, такие как количество валентных электронов, форма кристаллической решетки и др., рассматриваются как второстепенные по сравнению с модулем Юнга, хотя и влияющие на значения РВЭ, что отражает разброс на графике реальных значений РВЭ для металлов, имеющих близкие значения модуля Юнга.

В работе [3] рассматривается взаимосвязь РВЭ с твердостью поверхности. По результатам математического моделирования показывается, что твердость поверхности по Виккерсу HV находится в прямой пропорциональной зависимости от модуля Юнга E , из чего следует аналогичный характер зависимости параметра твердости по Виккерсу от РВЭ в виде функции шестой степени: $HV \sim \alpha \phi^6$. Определение коэффициента пропорциональности между РВЭ и модулем Юнга или твердостью по Виккерсу требует знания физических и геометрических параметров кристаллической решетки металла, недоступных

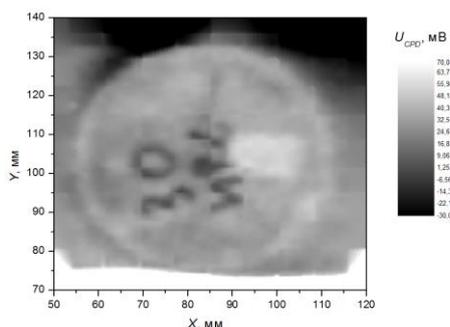


Рисунок 3 – Карта распределения относительных значений РВЭ образца с твердостью 30HRC

Можно сделать вывод, что, несмотря на теретически обоснованную взаимосвязь твердости и работы выхода электрона с поверхности металла, для реальных образцов, даже при тщательной предварительной подготовке их поверхности (как в описываемых исследованиях), влияние коррозионных явлений и поверхностных загрязнений многократно превосходит влияние физических факторов, таких как твердость и модуль Юнга. Поскольку реальные поверхности металлов всегда характеризуются неоднородностью распределения коррозионного потенциала и / или локальными загрязнениями, то визуализируемые методом сканирующего зонда Кельвина неоднородности

распределения КРП должны трактоваться как дефекты структуры и неоднородности химического состава поверхности образца, а не как различие механических свойств участков поверхности.

Литература

1. Hua, G. Generic relation between the electron work function and Young's modulus of metals / G. Hua, D. Li // Applied Physics Letters. – 2011, V. 99. – P. 041907.
2. Hua, G. The correlation between the electron work function and yield strength of metals / G. Hua, D. Li // Phys. Status Solidi B. – 2012. – P. 1–4.
3. Lu, H. Dependence of the mechanical behavior of alloys on their electron work function—An alternative parameter for materials design / H. Lu, G. Hua, D. Li // Applied Physics Letters. – 2013, V. 103. – P. 261902.
4. In Situ Time-Lapse SKPFM Investigation of Sensitized AA5083 Aluminum Alloy to Understand Localized Corrosion / Y. Liew [et al.] // J. Electrochem. Soc. – October 2020. – P. 1–28.
5. Steel Hardness Conversion Table [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.steelexpress.co.uk/steel-hardness-conversion.html>.
6. Многопараметрические измерения электрического потенциала поверхности с использованием адаптивной односигнальной модели / К. Л. Тявловский [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2008, № 2. – С. 27–32.

УДК 621.383

МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ПОЛЕВОГО ФОТОТРАНЗИСТОРА

Тявловский К. Л., Воробей Р. И., Гусев О. К., Свистун А. И., Тявловский А. К., Шадурская Л. И.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Описана структура и основные характеристики мультипараметрического сенсора на основе полевого фототранзистора. Применение полупроводников с многозарядной примесью позволяет реализовать качественно новые преобразовательные характеристики.

Ключевые слова: полевой фототранзистор; полупроводник; многозарядная примесь; управление характеристикой чувствительности.

MULTI -PARAMETRIC SENSORS BASED ON FIELD PHOTOTRANSISTOR

Tyavlovsky K., Vorobey R., Gusev O., Svistun A., Tyavlovsky A., Shadurskaya L.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The structure and basic characteristics of the multi -parametric sensors based on field phototransistor are described. The use of semiconductors with a multi-charged admixture allows you to realize a qualitatively new composition of the transformative characteristics.

Key words: field phototransistor; semiconductor; multifaceted admixture; control of the characterization of sensation.

*Адрес для переписки: Тявловский К. Л., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by*

Сенсоры должны избирательно преобразовывать измеряемую физическую величину в электрический сигнал в форме, удобной для передачи, обработки и сравнения с эталонной мерой. Однако в ряде случаев используются сенсоры, способные воспринимать и преобразовывать несколько физических величин с возможностью разделения одного измерительного сигнала путем использования специальных методик

и алгоритмов измерения [1]. Такие мультипараметрические сенсоры могут быть реализованы на основе полупроводников с собственной фотопроводимостью, слабо легированных глубокими примесями [2], формирующими в запрещенной зоне несколько энергетических уровней (рисунок 1) с разными зарядовыми состояниями. Особенности процессов перезарядки различных энергетических

уровней одной примеси обеспечивают комплекс новых преобразовательных характеристик [2]. Использование в сенсорах в качестве приборной основы структуры полевого транзистора [3] обеспечивает низкое выходное и высокое входное сопротивления сенсора, что облегчает его согласование с узлами измерительного преобразователя. Возможность оптического управления параметрами канала транзисторной структуры расширяет функциональность и диапазоны преобразования сенсора, делает возможность мультиплицировать и разделять информационные сигналы, вызванные входными воздействиями различной физической природы [2, 4].

Необходимо отметить, что диапазон спектральной чувствительности таких сенсоров зависит не только от материала примеси и управляющего сигнала, но и от толщины активной и пассивной области сенсорной структуры под входным окном. Для разных требуемых диапазонов спектральной чувствительности может потребоваться толщина материала от 10 мкм до, в случае освещения с обратной стороны, полной толщины подложки.

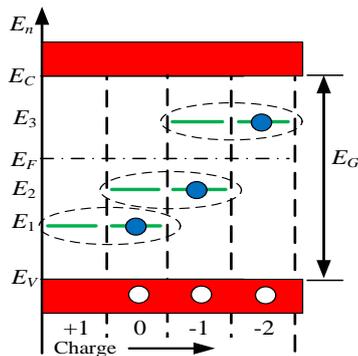


Рисунок 1 – Энергетическая диаграмма примесного центра с четырьмя зарядовыми состояниями

Такие разные требования к толщине структуры могут быть решены, например, селективным утоньшением материала под активной областью сенсора (рисунок 2) путем травления, или изготовлением сенсорной структуры на сапфире [5].

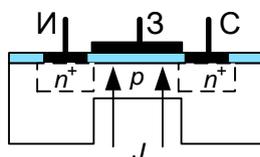


Рисунок 2 – Полевой фототранзистор с утоненной активной областью

При этом на одной сапфировой подложке, имеющей полосу пропускания от 0,2 до 6,0 мкм, могут быть размещены и сенсорная структура на основе кремния, и управляющие светодиоды на основе материалов A^3B^5 (рисунок 3), нанесенные на сапфировую подложку эпитаксиальным способом.

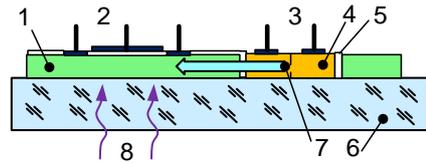


Рисунок 3 – Сенсорная структура на сапфире

Здесь 1 – это область полупроводника с многозарядной примесью, например, $Si(Ni)$, в которой сформирована структура полевого транзистора с индуцированным каналом и выводами 2; 3 – это выводы управляющего светодиода 4 на основе материалов A^3B^5 ; 5 – изолирующие слои диэлектрика; 6 – подложка из сапфира; 7 – управляющее оптическое излучение; 8 – входной оптический сигнал.

Управляющее излучение позволяет управлять как электрическими характеристиками полевого фототранзистора, такими как напряжение отсечки и крутизна управления, так и оптическими – переключением «красной» границы спектральной чувствительности и поддиапазонами чувствительности на энергетической характеристике [6]. Пределы регулировки всех характеристик зависят от применяемых материалов основного полупроводника и примеси, ее концентрации, структуры и технологии изготовления сенсора. На рисунке 4 представлена зависимость порогов переключения поддиапазонов энергетической характеристики от концентрации многозарядной примеси в кремнии [4, 6].

Отметим, что выходной сигнал сенсора носит мультипликативный характер от воздействия входных факторов различной физической природы: электрического поля и освещения. Причем электрический потенциал на затворе, в свою очередь, может изменяться под действием разнообразных факторов, например, контакта с биологическим объектом через иммерсионную жидкость [3].

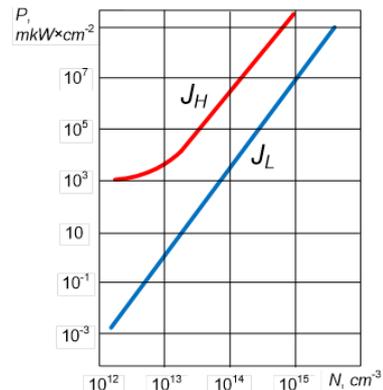


Рисунок 4 – Зависимость порогов переключения преобразовательной характеристики оптического сенсора от концентрации многозарядной примеси

Таким образом приборная структура одноэлементного сенсора реализует чувствительность к

нескольким входным факторам различной физической природы. Выбор материала полупроводника, типа глубокой примеси и ее концентрации позволяют создавать фотоприемники и измерительные преобразователи с заданными функциональными свойствами и характеристиками преобразования.

Литература

1. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными состояниями / О. К. Гусев [и др.]; под общ. ред. О. К. Гусева – Минск: БНТУ, 2010. – 582 с.
2. Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors with Intrinsic Photoconductivity / R. I. Vorobey [et al.] // Devices and Method of Measurements, – 2021, №2. – Pp. 108–116

3. Бурункова, Ю.Э. Сенсорные системы и материалы / Ю. Э. Бурункова, Е. О. Самуйлова, – СПб: Университет ИТМО, 2023. – 117 с.

4. Многопараметрические измерительные преобразователи систем оптической диагностики на основе функциональных датчиков / Р. И. Воробей [и др.] // Не разрушающий контроль и диагностика – 2023, № 1. – С. 37–45.

5. Масол, И. В. Информационные нанотехнологии / И. В. Масол, В. И. Осинский, О. Т. Сергеев. – Киев: изд-во Макрос, 2011. – 560 с.

6. Управление характеристиками фотоэлектрических преобразователей на основе полупроводников с многозарядной примесью / Воробей Р.И. [и др.] // Приборостроение: материалы 16 МНТК, Минск, 17–19 ноября 2023 г. / БНТУ. – Минск, 2023. – С. 39–40.

УДК 538.911; 538.958; 548.4; 620.3

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНЫМИ СЕНСОРНЫМИ СИСТЕМАМИ

Филатов С. А.¹, Гайкевич Д. Н.²

¹Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси

²Белорусский Национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе рассматриваются технологические основы и ключевые аспекты применения адаптивных технологий применительно к распределенным сенсорным системам мониторинга и оценки экологических параметров окружающей среды с использованием Интернета вещей (IoT).

Ключевые слова: сенсор, адаптивное управление, Arduino

ADAPTIVE CONTROL OF MICROPROCESSOR SENSOR SYSTEMS

Filatov S.¹, Gaikovich D.²,

¹A. V. Lykov Institute of Heat and Mass Transfer NAS of Belarus

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The paper discusses the technological foundations and key aspects of the application of adaptive technologies in relation to distributed sensor systems for monitoring and assessing environmental parameters using the Internet of Things (IoT).

Keywords: sensor, adaptive control, Arduino

Адрес для переписки: Филатов С.А. П., ИТМО НАН Беларуси, Бровки, 15, г.Минск, 220072, Республика Беларусь e-mail: fil@hmti.ac.by

Современные сенсорные системы анализа окружающей среды представляют собой высокотехнологичные устройства и платформы, которые используются для мониторинга и оценки различных экологических параметров. Наиболее распространенными типами таких систем являются атмосферные сенсоры, которые измеряют параметры воздуха, такие как уровень загрязняющих веществ (например, диоксид углерода, монооксид углерода, озон, частицы PM10 и PM2.5), влажность, температуру и давление. Также широко используются сенсоры контроля качества воды, которые применяются для контроля водных источников и систем водоснабжения, позволяя измерять pH, уровень растворенного кислорода, мутность и концентрацию химических веществ. По

мере развития прецизионного земледелия растет интерес к сенсорам почвы, которые оценивают свойства почвы, включая влажность, температуру, содержание питательных веществ и уровень загрязнения и к сенсорам для мониторинга биоразнообразия, которые используют методы, такие как акустическое зондирование или фото и видеокамеры с системой распознавания, для оценки состояния экосистем и видовое разнообразие.

Технологической основой для развития многоэлементных распределенных сенсорных систем является Интернет вещей (IoT): многие сенсорные системы интегрируются с IoT, что позволяет собирать, передавать и анализировать данные в реальном времени через интернет. Так как объем анализируемых данных многократно растет при

использовании микро- и наноразмерных датчиков для анализа данных используются методы анализа больших данных – используются алгоритмы машинного обучения и аналитические платформы для обработки больших объемов данных, получаемых от сенсоров, что позволяет выявлять паттерны и делать прогноза. Данные с сенсоров часто хранятся в облачных системах, что обеспечивает легкий доступ к информации и возможность обработки данных с помощью мощных вычислительных ресурсов.

Сенсорные системы широко применяются для мониторинга загрязнения и создания систем раннего предупреждения. Сенсорные системы помогают контролировать уровень загрязнения воздуха и воды, что позволяет принимать меры для улучшения экологии и развития устойчивого сельского хозяйства. Сенсорные системы помогают оптимизировать использование ресурсов, таких как вода и удобрения, что способствует устойчивому производству сельскохозяйственных продуктов. Кроме того они используются для оценки воздействия на окружающую среду и планирования застройки, а также для управления природными ресурсами.

Адаптивное управление сенсорными системами – это новый подход к управлению, который позволяет системам управления автоматически подстраиваться под изменяющиеся условия окружающей среды или задачи, используя данные, собранные с помощью сенсоров. Этот метод особенно полезен в областях, где внешние условия могут варьироваться, и нужно обеспечивать высокую точность и эффективность работы систем [1, 2].

Ключевые аспекты адаптивного управления сенсорными системами:

- сбор данных о состоянии окружающей среды или объекта, который необходимо контролировать. Это может включать параметры, такие как температура, давление, положение, скорость и другие величины.

- анализ данных: полученные данные обрабатываются с использованием различных алгоритмов, включая статистические методы и методы машинного обучения для оценки текущего состояния системы и выявления аномалии.

- адаптация: на основе анализа данных система принимает решения о необходимости изменения параметров управления.

- обратная связь: адаптивное управление часто включает в себя механизм обратной связи, который позволяет системе вести мониторинг эффективности своих действий и вносить изменения в реальном времени.

Примером реализации таких подходов является адаптивное управление сенсорными системами анализа качества воздуха с использованием Arduino, реализующее алгоритмы, которые могут

изменять параметры в зависимости от внешних условий или изменений в окружении. Это позволяет системе более эффективно реагировать на различные входные данные и улучшать производительность. Важным аспектом является взаимодействие с различными сенсорными модулями и обработка получаемых данных для принятия решений. Разработанный комплекс предназначен для анализа состава воздуха по содержанию CO, CO₂, NO₂, NH₃, SO₂, H₂S, O₃ и запыленности воздуха с помощью специализированных газовых сенсоров на основе металлооксидных проводников (MOS), типа MQ. Комплекс может быть использован для оценки чувствительности газовых сенсоров, долговременной стабильности и исследования переходных характеристик газовых сенсоров, а также для изучения принципов Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 1. Принципиальная электрическая схема датчика типа MQ приведена на рисунке 2. Аналоговый сигнал с каждого из газовых сенсоров поступает на входы аналого-цифрового преобразователя (10 бит) и с помощью модуля Arduino UNO R3 передается в регистрирующий персональный компьютер для регистрации и отображения уровня сигнала сенсора, концентрации определяемого газа (ppm) и временной информации.



Рисунок 1 – Общий вид установки для анализа состава воздуха по содержанию CO, CO₂, NO₂, NH₃, SO₂, H₂S, O₃ и запыленности воздуха

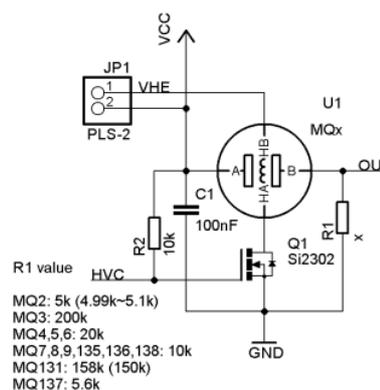


Рисунок 2 – Принципиальная электрическая схема датчика типа MQ

С целью обеспечения возможности адаптации к условиям измерений комплекс используется принудительное управление скоростью потока воздуха и измерения температуры и влажности

воздуха, как основных параметров влияющих на воспроизводимость измерений и чувствительность газовых сенсоров (минимальная обнаруживаемая концентрация не менее 200 ppm H₂ или 100 ppm для бутана при комнатной температуре).

Преимущества адаптивного управления включают повышение точности, эффективности и надежности систем, а также способность быстро реагировать на изменения в условиях работы. Применение адаптивного управления позволяет увеличить автономность сенсорных систем, которые могут работать в удаленных или труднодоступных местах без

необходимости в частом обслуживании. Адаптивное управление упрощает интеграцию с системами управления и принятия решений.

Литература

1. Zhao, Liang. Efficient Monitoring and Adaptive Control of Indoor Air Quality Based on IoT Technology and Fuzzy Inference / Liang Zhao [et al.] // Wireless Communications and Mobile Computing. – 2022.
2. Saini, J. Indoor Air Quality Monitoring Systems Based on Internet of Things: A Systematic Review / J. Saini, M. Dutta, G. Marques // Int J Environ Res Public Health. – 2020. – № 17(14). – P. 4942.

УДК: 681.7

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ КАНАЛОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Шилин А. А.¹, Журавлев И. С.¹, Киль И. А.¹

¹ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация

Аннотация. Целью данного исследования является оценить целесообразность применения различных типов тепловизионных каналов в составе беспилотных авиационных систем в зависимости от их дальности действия.
Ключевые слова: беспилотные авиационные системы, тепловизионные каналы.

ASSESSMENT OF THE APPLICABILITY OF THERMAL IMAGING CHANNELS OF VARIOUS TYPES FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

Shilin A.¹, Zhuravlev I.¹ Kil I.¹,

¹Tula State University
Tula, Russian Federation

Abstract. The purpose of this study is to assess the feasibility of using various types of thermal imaging channels as part of unmanned aircraft system depending on their recognition range.

Key words: thermal imager, UAS, recognition distance.

Адрес для переписки: Журавлев И. С., пр. Ленина, 92, г. Тула 300600, Российская Федерация
e-mail: info@tsu.tula.ru

В настоящее время беспилотные авиационные системы (БАС) активно применяются в различных отраслях промышленности.

Актуальность применения БАС обусловлена несколькими ключевыми факторами:

- снижение рисков для попадания в труднодоступные места;
- непрерывное наблюдение;
- гибкость и мобильность применения.

Для обеспечения непрерывного наблюдения и сбора информации БАС оснащены системами технического зрения, которые обеспечивают наблюдение в различных спектральных диапазонах.

Для обеспечения круглосуточной работы широко применяются тепловизионные приборы наблюдения.

Проблемой всех оптических приборов является то, что при увеличении фокусного расстояния и дальности распознавания увеличивается масса прибора и его габариты, которые ограничены полезной нагрузкой БАС.

Целью данного исследования является оценить целесообразность применения различных типов тепловизионных каналов в привязке к их дальности действия и массе.

Тепловизионные каналы бывают двух видов: с охлаждаемым приемником излучения и неохлаждаемым.

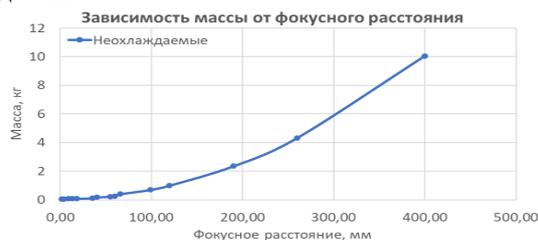


Рисунок 1 – Зависимость массы от фокусного расстояния у неохлаждаемых тепловизионных каналов



Рисунок 2 – Зависимость массы от фокусного расстояния у охлаждаемых тепловизионных каналов

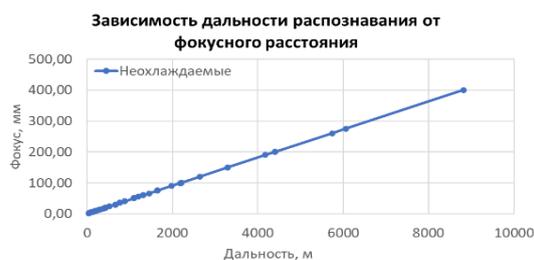


Рисунок 3 – Зависимость дальности распознавания от фокусного расстояния у неохлаждаемых тепловизионных каналов

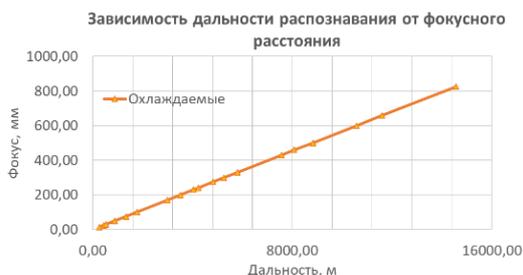


Рисунок 4 – Зависимость дальности распознавания от фокусного расстояния у охлаждаемых тепловизионных каналов

Для составления статистики был проведен анализ 26 приемников излучения и 80 объективов различных производителей, по итогам которого можно сделать вывод, что наличие микрокриогенной машины увеличивает массу и габариты охлаждаемых приемников, однако они имеют лучшую энергетическую чувствительность. Неохлаждаемые приемники имеют меньшую массу, однако требуют обеспечения высокой светосилы объектива для компенсации проблем с чувствительностью самого приемника.

По данным, полученным в результате анализа, были составлены графики зависимости массы от фокусного расстояния, и получены дальности распознавания для этих значений. Последнее сделано для объекта – легковой автомобиль по модифицированному критерию Джонсона при величине вероятности 80 % (рисунки 1–4). Размер чувствительного элемента охлаждаемого приемника взят равным 15 мкм, неохлаждаемого – равным 12 мкм.

Имея общую ось фокусного расстояния, можно объединить два этих графика и построить

зависимость массы от дальности действия для двух типов тепловизионных каналов.

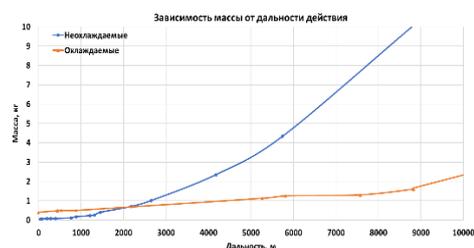


Рисунок 5 – Зависимость массы от дальности действия у тепловизионных каналов

По полученным результатам видно, что по дальности распознавания до расстояния 2 км неохлаждаемые тепловизоры выигрывают по массе. Если же распознать объект необходимо на большем расстоянии, то применение неохлаждаемых тепловизионных каналов приведет к существенному повышению массы прибора.

Ограничениями данного результата являются:

- 1) допущение, что объектив для неохлаждаемого приемника излучения имеет диафрагменное число не менее 1,2;
- 2) нет учета температурного контраста объект-фон, т. е. проводился геометрический расчет дальности распознавания;
- 3) используются только данные готовых объективов.

Стоит отметить, что планируются дальнейшие исследования, которые будут направлены на уточнение и устранение озвученных ограничений, а также на расширения подхода на другие значимые для применения на БАС параметры, например – такие как длина и диаметр тепловизионного канала, его стоимость и пр.

Литература

1. Якушенков, Ю. Г. Современные проблемы инфракрасной техники / Ю. Г. Якушенков, В. В. Тарасов. – М.: МИИГА и К, 2011. – 84 с.
2. Holst, G. C. Electro-optical imaging system performance / G. C. Holst. – JCD Publishing Winter Park, Florida USA, 2000. – 437 с.
3. Грузевич, Ю. К. Оптико-электронные приборы ночного видения / Ю. К. Грузевич. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 276 с.

Секция 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 615.8

THE USE OF SHOCK WAVE THERAPY IN SPORTS PRACTICE

Monich S., Liu Hang

Belarusian national technical university

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. In this paper, planning and applying a variety of recovery tools is an integral part of the training process in the preparation of qualified basketball players. Effective recovery tools make it possible to reduce the negative effects of high-volume and intensity loads, and avoid the appearance of overtraining in athletes. The search for the optimal combination of training and restorative means is currently one of the urgent problems in the practice of sports training.

Key words: tape, glue, adhesive strength, device, test.

ПРИМЕНЕНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ТЕРАПИИ В СПОРТИВНОЙ ПРАКТИКЕ

Монич С. Г., Лю Хан

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной работе рассматриваются планирование и применение разнообразных средств восстановления является неотъемлемой частью тренировочного процесса в подготовке квалифицированных баскетболистов. Эффективные средства восстановления позволяют снижать отрицательное воздействие больших по объему и интенсивности нагрузок, избегать появления состояния перетренированности у спортсменов. Поиск оптимального сочетания тренировочных и восстановительных средств на сегодняшний день является одной из актуальных проблем в практике спортивной подготовки.

Ключевые слова: ударно-волновая терапия, спорт, реабилитация, устройство, терапия

Адрес для переписки: Monich S., Prospekt Nezavisimosti, 65, Minsk 220113, Republic of Belarus

e-mail: sgmonich@bntu.by

Injuries that disrupt the functions of the musculo-skeletal system (MSS) lie in wait for a person all his life at every step. According to statistics, ankle injuries are the most common among all limb injuries. The largest percentage of ankle injuries occurs from incorrect landings when jumping off high objects, landing on uneven surfaces, and falls. In these cases, dislocations and fractures are most characteristic. There may be injuries and diseases of the soft tissues of this area – calf muscles, Achilles tendon, sprains and inflammation of the ligamentous apparatus. This problem is especially relevant in sports. Modern training of high-class athletes requires strenuous training regimes and places high demands on the athlete's body, in particular on the development of overstrain and, as a result, increased injuries [1].

The intensification of the training and competitive processes in basketball requires athletes to demonstrate the maximum possible physical abilities, including performance. However, the adaptive processes occurring in the body of athletes under the influence of loads are caused by complex changes in organs and tissues. Insufficient attention to recovery can lead to the accumulation of fatigue and even the appearance of maladaptive changes, which can further cause frequent injuries and diseases. In this regard, the question arises of studying the means of recovery and their effect on the functional state and physical performance of athletes after intensive training.

The analysis of scientific and methodological literature devoted to the problem of athletes' recovery has revealed that in sports practice, rehabilitation measures are applied taking into account the specifics of the type of activity and may have a differentiated character depending on the load indicators, the duration of the preparatory period, the degree of fatigue, the functional state and qualifications of athletes [2].

Modern studies of sports training processes have shown that the recovery process after stress should be attributed to factors contributing to improving the effectiveness of training athletes of various qualifications. The intensification and increase in the intensity of training and competitive processes in basketball necessitated the systematization of recovery tools used in the process of training qualified basketball players in order to increase their performance, prevent injuries, as well as as a necessary condition for increasing the volume and intensity of training loads.

The mechanism of the impact of the shock wave on the motor apparatus, despite the appropriate equipment available to doctors for a long time, has not yet been clarified. All the previously assumed mechanisms of influence are nothing more than hypotheses.

Several theories are put forward to explain the analgesic effects of the shock wave [2]:

– the shell of the nociceptor cell in focus may be damaged, so that the source of pain can no longer arise.

– the principle of hyperstimulating analgesia: an unusually strong irritation transmitted through neurons to the brain can activate the descending inhibitory tracts of the nervous system, which block nociceptive information flowing in parallel to the spinal cord.

It is assumed that osteogenesis is exposed to a shock wave. In this case, microcracks occur and due to mechanical damage, fibroblasts transform into osteoblasts.

Under the influence of the shock wave, there is a local increase in blood flow, a change in the permeability of cell membranes, activation of metabolism and restoration of cellular ion exchange. This ensures intensive elimination of the end products of catabolism, stimulation of tissue repair processes, anti-inflammatory and decongestant effect [1, 6].

The method steadily reduces pain sensitivity, muscle spasm, loosens painful bone outgrowths, calcification sites, fibrous foci, followed by gradual resorption of their fragments, increases the elasticity of ligaments and tendons, improves local blood circulation, significantly reduces pain syndrome, restores the volume of movements in joints, increases the tolerance of physical exertion and, as a result, resumes professional or household activities.

Extracorporeal shockwave therapy is an alternative to surgical treatment of diseases of the musculoskeletal system. Clinical studies have shown [4, 5] that 75 % of patients who underwent UHT recovered. And only 25 % had surgery.

Prerequisites for the use of UVT in the treatment of degenerative diseases of the spine are a number of diseases of the spine, which are based on metabolic disorders and degenerative processes in tissues (osteocondrosis, scoliosis, spondylosis, intervertebral disc protrusion, etc.).

An electromagnetic shock wave generator is known [3] containing a hollow cylindrical inductor 1 consisting of a cylindrical spiral coil 2, a reverse current line 3 and a metal shell 4 separated from the inductor coil by an insulating layer (Figure 1). The inductor is fixed with the possibility of mounting in a dielectric flange 5, which is mounted on a reflector 6.

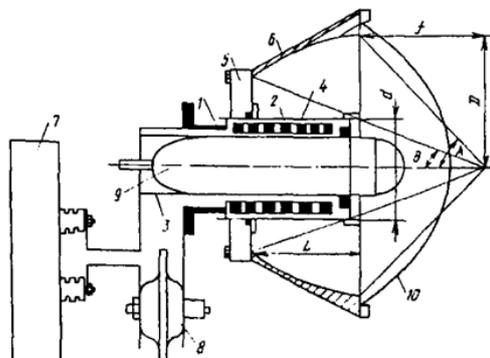


Figure 1 – An electromagnetic shock wave generator

The reverse current line is connected to one of the terminals of the capacitive accumulator 7, the second

terminal of which is connected to one electrode of the arrester 8, and the output of the spiral coil of the inductor is connected to its other electrode. The device works as follows. The capacitor 7, charged to the operating voltage, when a starting pulse is applied to the arrester 8, is discharged through the coil 2 of the inductor 1. A current pulse through the inductor coil excites an eddy current in the metal shell 4. The force interaction of currents in the inductor coil with currents in the metal membrane causes shock acceleration of the metal shell.

The moving metal shell excites a diverging cylindrical shock wave pulse in the surrounding liquid, which, when reflected from the surface of the reflector 6, focuses in its focal zone.

The advantages of this design are high reliability and efficiency, stable operation of the arrester and its long service life, low negative pressure amplitude.

During the procedure, the response of the patient's body to the treatment is measured, presumably by measuring the parameters of acupuncture points associated with the place of therapeutic effect. The measurement information is analyzed by the control circuit for the presence of tissue damage by the shock wave. If necessary, the procedure parameters are automatically changed according to the program stored in the device's memory.

The device works as follows (Figure 2). A high-amplitude current pulse flows through the inductor, which leads to the appearance of a magnetic field around the conductor.

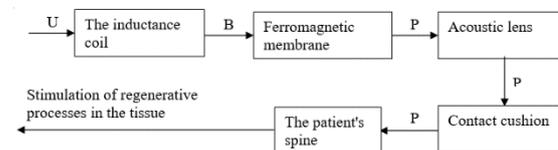


Figure 2 – Block diagram of the shock wave head

In this case, eddy currents are induced in the ferromagnetic membrane, which create their own magnetic field directed counter to the magnetic field of the coil. As a result of the interaction of these fields, the membrane is repelled from the coil, which leads to the appearance of a shock wave. An acoustic lens transforms a flat shock wave front into a spherical converging one. The contact pad is used to conduct acoustic energy into biological tissue.

Literature

1. Extracorporeal Shock Waves Activate Migration, Proliferation and Inflammatory Pathways in Fibroblasts and Keratinocytes, and Improve Wound Healing in an Open-Label, Single-Arm Study in Patients with Therapy-Refractory Chronic Leg Ulcers. / I. Aschermann [et al.] // Cell Physiol Biochem. – 2017. – V. 41, № 3. – P. 890–906.
2. Berta L. Extracorporeal shock waves enhance normal broblast proliferation in vitro and activate mRNA expression for TGF-beta1 and for collagen types I and III / Berta L. [et al.] // Acta Orthop. – 2009. – V. 80, № 5. – P. 612–617.

3. Electromagnetic shock wave generator with a reflector: pat. RU 2122363, Y. V. Andrianov, O. N. Andrianova, K. G. Bagaudinov, B. A. Garilevich. – Publ. 11.27.98.

4. Shmagoy, V. L. The place of shock wave therapy in postoperative rehabilitation of patients with disorders of reparative osteogenesis after fractures of the shin bones / V. L. Shmagoy, R. G. Rodak, V. V. Karas // Medicine of transport in Ukraine. – 2014. – № 4. – P. 58–63.

5. Stimulation of peripheral nerve regeneration: current state, problems and prospects / I. N. Shchanitsyn [et al.] // Successes of physiological sciences. – 2017. – V. 48, № 3. – P. 92–112.

6. Shock wave therapy in the complex treatment and rehabilitation of patients with coronary artery disease with refractory angina pectoris / A. M. Shchegolkov [et al.] // Bulletin of Restorative Medicine. – 2014. – № 6. – P. 69–75.

УДК 621.382

ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ФОТОРЕЗИСТА AZ nLOF 5510

Абрамов С. А.¹, Бринкевич Д. И.¹, Просолович В. С.¹, Колос В. В.², Зубова О. А.², Черный В. В.³, Вабищевич С. А.⁴, Вабищевич Н. В.⁴

¹Белорусский государственный университет

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

³Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

⁴Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой
Новополоцк, Республика Беларусь

Аннотация. Методом индентирования исследованы пленки негативного фоторезиста AZ nLOF 5510 толщиной 0,99 мкм, нанесенные на поверхность пластин кремния методом центрифугирования. Пленки AZ nLOF 5510 ведут себя как упругопластичные материалы, в которых присутствуют растягивающие упругие напряжения. После дополнительной сушки и ионного травления поведение пленок AZ nLOF 5510 при индентировании схоже с поведением твердых непластичных материалов. Такая обработка приводила также увеличению микротвердости структур фоторезист/кремний, что обусловлено сшиванием молекул фоторезиста, приводящим к утрате упругопластических свойств пленки. Показано, что образование при ионном травлении на поверхности фоторезистивной пленки тонкого углеродоподобного слоя препятствует растяжению пленки после снятия нагрузки с индентора.

Ключевые слова: негативный фоторезист, микроиндентирование, микротвердость, ионное травление.

STRENGTH PROPERTIES OF AZ nLOF 5510PHOTORESIST FILMS

Abramov S. A.¹, Brinkevich D. I.¹, Prosolovich V. S.¹, Kolos V. V.², Zubova O. A.², Chornyi V. V.³, Vabishchvich S. A.⁴, Vabishchvich N. V.⁴

¹Belarusian State University,

²«INTEGRAL» Joint Stock Company

³Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

⁴Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk

Novo Polotsk, Republic of Belarus

Abstract. Films of AZ nLOF 5510 negative photoresist with a thickness of 0.99 microns deposited on the surface of silicon wafers by centrifugation were studied by the indentation method. AZ nLOF 5510 films behave like elastoplastic materials in which tensile elastic stresses are present. After additional drying and ion etching, the behavior of AZ nLOF 5510 films during indentation is similar to that of solid non-plastic materials. Such treatment also led to an increase in the microhardness of the photoresist/silicon structures, which is due to the crosslinking of photoresist molecules. It leads to a loss of the elastic-plastic properties of the film. It is shown that the formation of a thin carbon-like layer on the surface of a photoresistive film during ion etching prevents the film from stretching after the load is removed from the indenter.

Key words: negative photoresist, microindentation, microhardness, ion etching.

Адрес для переписки: Просолович В. С., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: prosolovich@bsu.by

Фоторезист AZ nLOF 5510 (производитель MicroChemicals GmbH, Германия) широко используются в однослойных процессах обратной (lift-off) литографии микроэлектроники. Он предназначен для получения тонких пленок толщиной от 0,7 до 1,6 мкм. Так при скорости вращения цен-

трифуги 3000 об/мин толщина фоторезистивной пленки AZ nLOF 5510 составляет 0,90 мкм. Фоторезист AZ nLOF 5510 разработан под *i*-линию ($\lambda = 365$ нм) дуговой лампы и применяется в процессах RIE травления и ионной имплантации. Фоторезист (ФР) чувствителен к электронному

облучению, что позволяет комбинировать ультрафиолетовую и высокоразрешающую электронную литографию.

Цель настоящей работы – исследование методом микроиндентирования прочностных свойств пленок негативного фоторезиста AZ nLOF 5510 на монокристаллическом кремнии.

Материалы и методы измерений. Пленки негативных фоторезистов AZ nLOF 5510 толщиной 0,99 мкм наносились методом центрифугирования на поверхность пластин кремния с ориентацией (111). Перед формированием пленки ФР кремниевые пластины подвергали стандартному циклу обработки поверхности в органических и неорганических растворителях. После нанесения фоторезиста на рабочую сторону пластины проводилась сушка при температуре 90 °С длительностью 60 с. Часть образцов впоследствии подвергалась дополнительному усилению (облучение светом с $\lambda = 404$ нм в течение 106 с и последующей сушке при 115 °С длительностью 60 с) и ионному травлению в течение 20 мин в потоке ионов Ag^+ (скорость потока 6 см³/мин) с энергией 160 эВ. Измерение геометрической толщины пленок фоторезистов выполнялось на растровом электронном микроскопе.

Измерение микротвердости проводилось на приборе ПМТ-3 по стандартной методике при комнатной температуре [1]. В качестве индентора использовался алмазный наконечник в форме пирамиды с квадратным основанием и углом при вершине $\alpha = 136^\circ$. Нагрузка на индентор варьировалась в пределах 1–50 г. Длительность нагружения составляла 2 с; выдержка под нагрузкой 5 с. При измерении для каждой экспериментальной точки на поверхность образца наносилось не менее 50 отпечатков. Обработка результатов измерений проводилась с использованием методов математической статистики, что обеспечивало погрешность измерений восстановленной микротвердости менее 2,5 % с доверительной вероятностью 0,95.

Эксперимент. Пленки фоторезиста AZ nLOF 5510 обладают хорошей адгезией к кремнию. При индентировании не было замечено даже единичных случаев растрескивания, появления радиальных трещин у углов отпечатков индентора или отслаивания пленок от кремниевой подложки. Это характерно как для исходных пленок, так и для пленок, подвергнутых дополнительному усилению и ионному травлению.

Анализ отпечатков индентора и «навалов» вокруг них, образованных вытесненным из-под индентора фоторезистом, показывает, что исходные пленки AZ nLOF 5510 ведут себя как упругопластичные материалы, в которых присутствуют растягивающие упругие напряжения. Эти упругие напряжения обуславливают релаксацию фоторезистивной пленки после снятия нагрузки, приво-

дящую к «рассасыванию» выдавленного в навалы материала. После дополнительного усиления и последующего ионного травления характер поведения пленок AZ nLOF 5510 при индентировании существенным образом изменяется. Они ведут себя как твердые непластичные материалы. Об этом свидетельствует отсутствие релаксации фоторезистивной пленки после снятия нагрузки, а также наличие трещин в области навалов у некоторых отпечатков при нагрузках 50 и 20 г.

Кроме того, после дополнительного усиления и последующего ионного травления имело место увеличение микротвердости структур фоторезист/кремний при всех использовавшихся в работе нагрузках (рисунок 1).

При минимальной нагрузке 1 г индентор локализован в фоторезистивной пленке. Поэтому значения восстановленной микротвердости, измеренные при этой нагрузке соответствуют истинной микротвердости фоторезистивной пленки. Дополнительное усиление с использованием ионного травления приводило к увеличению истинной микротвердости пленки на 50 % – с 0,14 до 0,21 ГПа. Отметим, что возрастание микротвердости фоторезистивных пленок при сушке и различных высокоэнергетических воздействиях наблюдалось ранее в работах [2–4] и связывалось со сшиванием молекул ФР. Сшивание молекул фоторезиста должно также приводить к утрате упругопластических свойств пленки.

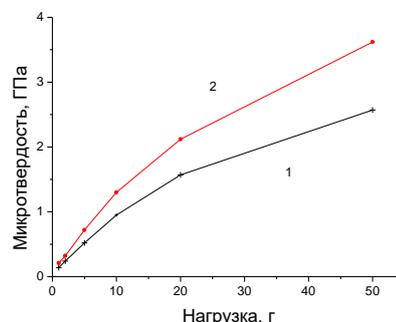


Рисунок 1 – Зависимость микротвердости от нагрузки пленок фоторезиста AZ nLOF5510 на кремнии исходных (1) и после дополнительного усиления и ионного травления (2)

При повышении нагрузки ≥ 5 г индентор проникает в кремниевую подложку и микротвердость микротвердость структуры фоторезист/Si начинает расти, стремясь к значениям микротвердости ~ 9 ГПа, характерным для монокристаллического кремния. Увеличение микротвердости при этих нагрузках, вероятнее всего, обусловлено образованием при ионном травлении на поверхности фоторезистивной пленки тонкого углеродоподобного слоя, препятствующего растяжению пленки после снятия нагрузки.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания 2.16 Государственной программы науч-

ных исследований «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Наноструктурные материалы, нанотехнологии, нанотехника («Наноструктура»)).

Литература

1. Бринкевич, Д. И. Физико-механические свойства эпитаксиальных слоев GaP / Д. И. Бринкевич, Н. В. Вабищевич, С. А. Вабищевич // Вестник Полоцкого университета. Серия С. Фундаментальные науки. – 2010. – № 9. – С. 92–97.

2. Garcia, I. T. S. The effects of nuclear and electronic stopping powers on ion irradiated novolac-diazoquinone films / I. T. S. Garcia, F. C. Zawislak, D. Samios // Applied Surface Science. – 2004. – V. 228, № 1–4. – P. 63–76.

3. Brinkevich, D. I. Ion Implantation in Diazoquinone-Novolac Photoresist / D. I. Brinkevich, S. D. Brinkevich, V. S. Prosolovich // High Energy Chemistry. – 2022. – V. 56, № 4. – P. 270–276.

4. Ion implantation of positive photoresists // D. I. Brinkevich [et al.] // Russian Federation Microelectronics. – 2014. – V. 43, № 3. – P. 194–200.

УДК 621.382

СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТОВ ДЛЯ ОБРАТНОЙ ЛИТОГРАФИИ

Абрамов С. А.¹, Бринкевич Д. И.¹, Просолович В. С.¹, Колос В. В.², Зубова О. А.², Черный В. В.³

¹Белорусский государственный университет

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

³Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Методом ИК-Фурье-спектроскопии диффузного отражения исследованы пленки негативных фоторезистов AZ nLOF 2020 и AZ nLOF 2070 толщиной 5,9 мкм, нанесенные на поверхность пластин кремния методом центрифугирования. Наиболее интенсивными являются полосы валентных колебаний ароматического кольца (~1500 см⁻¹), пульсационных колебаний углеродного скелета ароматического кольца (двойной максимум ~1595 и 1610 см⁻¹), широкая структурированная полоса с несколькими максимумами в диапазоне 1050–1270 см⁻¹ и полоса, связанная с СН₂-мостиком. Показано, что полоса колебаний СН₃ групп при 2945 см⁻¹ обусловлена растворителем. Различия в спектрах диффузного отражения фоторезистов AZ nLOF 2020 и AZ nLOF 2070 связаны с наличием в пленках остаточного растворителя.

Ключевые слова: негативный фоторезист, ИК-спектроскопия, диффузное отражение, растворитель.

ABSORPTION SPECTRA OF PHOTORESISTS FOR REVERSE LITHOGRAPHY

Abramov S.¹, Brinkevich D.¹, Prosolovich V.¹, Kolos V.², Zubova O.², Chornyi V.³

¹Belarusian State University

²“INTEGRAL” Joint Stock Company

³Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Films of AZ nLOF 2020 and AZ nLOF 2070 negative photoresists with a thickness of 5.9 microns deposited on the surface of silicon wafers by centrifugation were studied by the method of diffuse reflection IR-Fourier spectroscopy. The most intense are the bands of valence vibrations of the aromatic ring (~1500 cm⁻¹), pulsation vibrations of the carbon skeleton of the aromatic ring (double maximum ~1595 and 1610 cm⁻¹), a wide structured band with several maxima in the range of 1050–1270 cm⁻¹ and a band associated with the CH₂ bridge. It is shown that the oscillation band of the CH₃ groups at 2945 cm⁻¹ is due to a solvent. Differences in the diffuse reflection spectra of AZ nLOF2020 and AZ nLOF2070 photoresists are associated with the presence of residual solvent in the films.

Key words: negative photoresist, IR spectroscopy, diffuse reflection, solvent.

Адрес для переписки: Просолович В. С., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: prosolovich@bsu.by

Фоторезисты серии AZ nLOF 20XX (производитель MicroChemicals GmbH, Германия) широко используются в процессах обратной (lift-off) литографии современной микроэлектроники и обладают высокой термической стабильностью. Они предназначены для получения пленок толщиной 2 мкм (для AZ nLOF 2020) и 7 мкм (для AZ nLOF 2070) при скорости вращения центрифуги 3000 об/мин и разработаны под i-линию ($\lambda = 365$ нм) дуговой лампы. При этом они не чувствительны к g-

и h-линиям с $\lambda = 435$ и 404 нм, соответственно. Они чувствительны к электронному облучению, что позволяет комбинировать ультрафиолетовую и высококоразрешающую электронную литографию.

Цель настоящей работы – исследование методом диффузного отражения оптических характеристик пленок негативных фоторезистов AZ nLOF 2020 и AZ nLOF 2070 на кремнии.

Материалы и методы измерений. Пленки негативных фоторезистов AZ nLOF 2020 и AZ

nLOF 2070 толщиной 5.9 мкм наносились методом центрифугирования на поверхность пластин кремния с ориентацией (100). Перед формированием пленки фоторезиста (ФР) кремниевые пластины подвергали стандартному циклу обработки поверхности в органических и неорганических растворителях. После нанесения фоторезиста на рабочую сторону пластины проводилась сушка при температуре 110 °С длительностью 60 с. Измерение геометрической толщины пленок фоторезистов выполнялось на растровом электронном микроскопе.

ИК-Фурье спектры структур фоторезист/Si регистрировались в диапазоне 400–4000 см⁻¹ при комнатной температуре спектрофотометром ALPNA (Bruker Optik GmbH) с приставкой для измерения диффузного отражения. Количество сканов 24. Разрешение было не хуже 4 см⁻¹. Коррекция фона проводилась перед каждым измерением.

Эксперимент. В спектре диффузного отражения структур фоторезист/Si полосы поглощения наблюдаются на фоне первой и второй интерференционных полос в области волновых чисел 700–1700 см⁻¹ (рисунок 1), что осложняет анализ трансформации полос поглощения при различных внешних воздействиях.

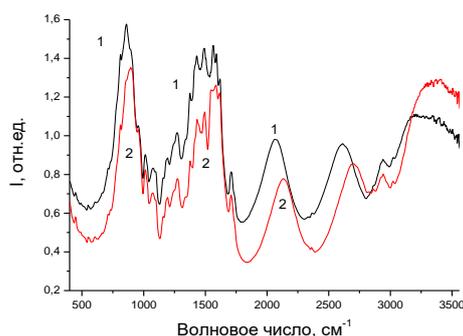


Рисунок 1 – Спектры диффузного отражения пленок фоторезистов AZ nLOF2020 (1) и AZ nLOF2070 (2)

Наиболее интенсивными в спектре диффузного отражения фоторезистивных пленок являются полосы валентных колебаний ароматического кольца (~1500 см⁻¹), пульсационных колебаний углеродного скелета ароматического кольца (сдвоенный максимум ~1595 и 1610 см⁻¹) и полоса с максимумом ~1430 см⁻¹, обусловленная колебаниями бензольного кольца, связанного с СН₂-мостиком [1, 2]. Эти полосы характерны для фенолформальдегидной смолы [1] и наблюдались ранее в различных позитивных [3, 4] и негативных [5] фоторезистах на основе фенолформальдегидных смол. Это обстоятельство позволяет утверждать, что основным компонентом фоторезистов серии AZ nLOF20XX является фенолформальдегидная смола.

Во всех спектрах фоторезистивных пленок также наблюдалась широкая структурированная по-

лоса с несколькими максимумами в диапазоне 1050–1270 см⁻¹. В этом интервале волновых чисел наблюдаются колебания С-О и С-С-связей в растворителе и плоскостные деформационные колебания С-О связей фенольной группы фенолформальдегидной смолы [5]. Кроме того, в диапазоне волновых чисел 1700–1720 см⁻¹ наблюдалась полоса, обусловленная валентными колебаниями двойных связей С = О_{ср} в сложных ароматических эфирах.

Наблюдался также ряд полос средней и малой интенсивности в области волновых чисел 400–900 см⁻¹, энергетическое положение и принадлежность которых к функциональным группам были подробно рассмотрены в [5, 6]. Наиболее сильной из них была полоса деформационных колебаний С-Н связей с максимумом при 810 см⁻¹, обусловленная внеплоскостными колебаниями С-Н-связей ароматического кольца.

В области валентных колебаний С-Н связей в спектрах диффузного отражения ФР пленок наблюдались полосы с максимумами при ~2870 и 2925 см⁻¹, обусловленные ассиметричными и симметричными валентными колебаниями С-Н₂ связей, и полоса с максимумом при 3010 см⁻¹, связанная с валентными колебаниями С-Н связи. Отметим, что интенсивность полос колебаний С-Н₂ связей была существенно выше интенсивности полосы колебаний С-Н связей. В спектрах всех ФР пленок также присутствовала широкая слабая полоса с максимумом в области ~3300 см⁻¹, обусловленная валентными колебаниями О-Н связи.

Энергетическое положение полос в обоих марках ФР было идентично. Спектры пленок AZ nLOF2070 и AZ nLOF2020 различаются только интенсивностью отдельных полос, связанных с наличием остаточного растворителя – полос с максимумами в диапазоне волновых чисел 1050–1270 см⁻¹ и 1700–1720 см⁻¹, а также полосы с максимумом при 2945 см⁻¹, обусловленной ассиметричными валентными колебаниями СН₃ групп. Полученные экспериментальные результаты, а также наличие трех СН₃ групп в составе PGMEA – растворителя фоторезистов серии AZ nLOF20XX, указывают на, что полоса колебаний СН₃ групп при 2945 см⁻¹ обусловлена растворителем. Этот вывод подтверждается также тем, что интенсивность указанной полосы снижалась после дополнительной сушки фоторезистивных пленок в течение 60 с при 115 °С.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания 2.16 Государственной программы научных исследований «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Наноструктурные материалы, нанотехнологии, нанотехника («Наноструктура»).

Литература

1. Poljansek, I. Characterization of phenol-urea-formaldehyde resin by inline FTIR spectroscopy / I. Poljansek,

U. Sebenik, M. Krajnc // Journal of Applied Polymer Science. – 2006. – V. 99, № 5. – P. 2016–2028.

2. Frustrated total internal reflection spectra of diazoquinone–novolac photoresist films / S. D. Brinkevich [et al.] // Journal of Applied Spectroscopy. – 2021. – V. 87, № 6. – P. 1072–1078.

3. Modification of Diazoquinone–Novolac Photoresist Films beyond the Region of Implantation of B⁺ Ions / S. D. Brinkevich [et al.] // High energy chemistry. – 2020. – V. 54, № 5. – P. 342–351.

4. Garcia. I. T. S. The effects of nuclear and electronic stopping powers on ion irradiated novolac–diazoquinone

films / I. T. S. Garcia, F. C. Zawislak, D. Samios // Applied Surface Science. – 2004. – V. 228, № 1–4. – P. 63–76.

5. Fourier-IR spectroscopy of photoresist/silicon structures for explosive lithography / D. I. Brinkevich [et al.] // Journal of Applied Spectroscopy. – 2024. – V. 90, № 6. – P. 1223–1228.

6. Бринкевич, Д. И. Модификация пленок диазохиноноволачного фоторезиста имплантацией ионов бора / Д. И. Бринкевич, В. С. Просолович, Ю. Н. Янковский // Журнал Белорусского государственного университета. – 2020. – № 2. – С. 62–69.

УДК.621.923.9

ОБРАБОТКА САМОЦВЕТНЫХ КАМНЕЙ НА ГАЛТОВОЧНОМ БАРАБАНЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ

Амонов С. Т.¹, Холов Ф. Б.¹, Эмомов Н. Б.¹, Луговой В. П.², Мирзоалиев И.¹

¹Таджикский технический университет им. М. С. Осими
Душанбе, Республика Таджикистан

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной статье рассмотрен вопрос повышения производительности обработки на галтовочном барабане с горизонтальной осью вращения. Исследования показали, что основной причиной низкой производительности обработки с использованием данных барабанов является малая скорость вращения, которая не обеспечивает необходимую частоту перемешивания и скорость относительного скольжения заготовок с абразивной суспензией. В свою очередь повышенная частота вращения галтовочного барабана также приводит к снижению производительности шлифования из-за действия центробежных сил, действие которых приводит к прижиму заготовок к стенке барабана. В связи с этим предложена модернизированная конструкция барабана, работающего при высоких скоростях относительного скольжения абразивных частиц и заготовок, обеспечивающего эффективную работу при повышенных скоростях.

Ключевые слова: галтовочный барабан, абразивная галтовка, центробежная сила, частота вращения, загрузочная масса.

PROCESSING OF GEM STONES ON A TURNING DRUM OF AN IMPROVED DESIGN

Amonov S.¹, Kholov F.¹, Emomov N.¹, Lugovoy V.², Mirzoaliev I.¹

¹Tajik Technical University named after. M. S. Oshimi Dushanbe
Republic of Tajikistan Dushanbe, Republic of Tajikistan

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. This article discusses the issue of increasing processing productivity on a tumbling drum with a horizontal axis of rotation. Research has shown that the main reason for low processing productivity using these drums is the low rotation speed, which does not provide the necessary mixing frequency and relative sliding speed of workpieces with an abrasive suspension. In this regard, a modernized drum design has been proposed, operating at high speeds of relative sliding of abrasive particles and workpieces, ensuring efficient operation at higher speeds.

Key words: tumbling drum, abrasive tumbling, centrifugal force, rotation speed, loading mass.

Адрес для переписки: Амонов С. Т., пр. академиков Раджабовых, 10, г. Душанбе 734042, Республика Таджикистан, e-mail: ttu@ttu.tj

Обзорная часть. Известно, что интенсивность съема материала при обработке в галтовочных барабанах с горизонтальной осью вращения недостаточно высокая. При этом процесс обработки происходит неравномерно по всему объему рабочей зоны и сопровождается большим разбросом обрабатываемых заготовок. Абразивная обработка в результате относительного скольжения и перемешивания заготовок и абразивной массы. При малых оборотах барабана частота перемеши-

вания заготовок и интенсивность обработки невысокая, а при повышенных оборотах от действия центробежных сил происходит прижатие заготовок к стенке барабана, в результате чего их обработка практически прекращается [1, 2]. В связи с этим при обработке в галтовочном барабане важно установить оптимальные частоты вращения, которые позволят достигнуть интенсивного пере, перемешивание загрузки в барабане, а результате – наибольшую производительность об-

работки. Общим недостатком всех конструкции ротационной галтовки является ограниченная частота вращения барабана, превышение которой вызывает действие центробежных сил, и которая не должна превышать силу тяжести заготовок.

Описание конструкции галтовочного барабана. Целью модернизации конструкции является повышение производительности и улучшение качество обработки заготовок.

Поставленная цель достигается тем, что в конструкции станка предусмотрен скребок, свободно установленный на валу вращения барабана, который препятствует при обработке прижиму заготовок к стенкам барабана. К скребку присоединена массивная деталь, которая обеспечивает устойчивую работу устройства при наличии большой массы обрабатываемых заготовок.

Конструкция устройства приведена на рисунке 1. Она состоит из барабанной головки 1, вала 2, скребка 3.

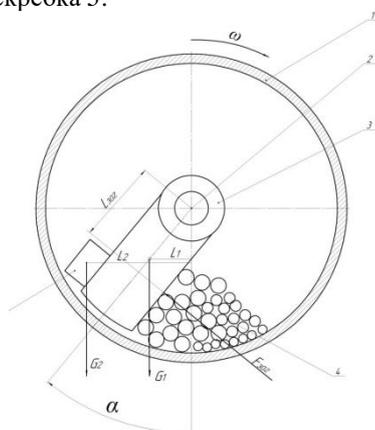


Рисунок 1 – Схема действия сил при обработке на модернизированном галтовочном станке

Устройство работает следующим образом. Предварительно в полость барабана загружается абразивная смесь и заготовки. Крышка барабана закрывается и барабану сообщается вращательное движение. При этом заготовки от действия силы трения со стенкой барабана перемещаются в направлении вращения барабана и давят на скребок, проворачивая его на угол α . Значение сил G_1 и G_2 весу скребка и груза, которые можно определить взвешиванием. Зная величины плеча силы $G_1 - L_1$, равное расстоянию от оси вращения скребка до направления действия данной силы, и расстояние L_2 – плечо силы G_2 , равное расстоянию от оси вращения скребка до направления действия этой силы, можно записать уравнение равновесия сил

$$G_1 L_1 \sin \alpha + G_2 L_2 \sin \alpha - F_{\text{заг}} = 0 \quad (1),$$

где α – угол поворота скребка под действием заготовок.

Если $F_{\text{заг}} > G_1$ скребок начинает вращаться с вместе с заготовками: в этом случае необходимо увечить вес сменного груза G_2 .

Таким образом, при вращении галтовочного барабана скребок удерживает заготовки от прижима к внутренней стенке барабана. При этом скорость скольжения по поверхности барабана примерно равно линейной скорости барабана.

Экспериментальные испытания производилась при частоте вращения барабана в пределах от 20 до 220 об/мин. Заготовкой служили шаровидные заготовки из лазурита. На рисунке 2 линия 1 демонстрирует результаты съема материала при галтовке без использования скребка, а линия 2 – при работе со скребком. Из графика видно, что при обработке без скребка наибольшая производительность достигается при частоте вращения барабана 100 об/мин, после чего производительность обработки начинает резко снижаться.

При обработке в галтовочном барабане с использованием скребка производительность растет непрерывно. Было установлено, что применение нового устройства обеспечило повышение точности формы сфероидальных заготовок на 30 %.

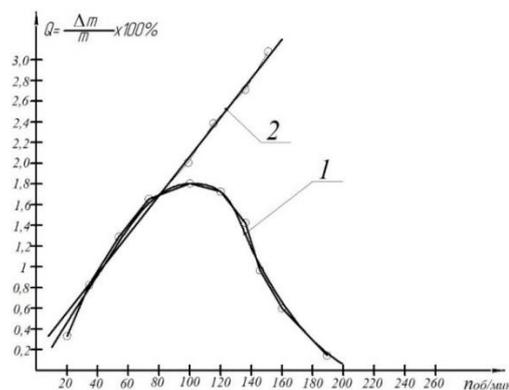


Рисунок 2 – График зависимости величины съема от частоты вращения барабана

Выводы. Сравнение результатов испытания модернизированного устройства обеспечивает повышение производительности обработки и точности формы обработки заготовок. Установлено, что скорость скольжения заготовок по поверхности барабана примерно равна линейной скорости барабана. Устройство обеспечивает производительную обработку заготовок при больших линейных скоростях, которая пропорционально растет при увеличении линейной скорости барабана. Устройство может быть эффективно использовано при обработке самоцветных камней твердой породы для снижения трудоемкости шлифования.

Литература

1. Мирзоалиев, И. Барабанная галтовка заготовок из самоцветных камней / И. Мирзоалиев, А. И. Мирзоалиев, Х. Ф. Орифова // Научные горизонты. – 2022. – № 8 (60). – С.61-72.
2. А. с. СССР № 566717. Галтовочный барабан / Д. Х Аюкасов, В. П Озеров, А. Н Фокин. – Опубл. 30.07.77.

УДК 006.915.1-531.715.1

КЛАССИФИКАЦИОННАЯ СХЕМА ИСТОЧНИКОВ ПОГРЕШНОСТЕЙ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ НАНОЧАСТИЦ, НАХОДЯЩИХСЯ НА ПОДЛОЖКЕ, В ЖИДКОСТИ И В ВОЗДУХЕ

Багдюн А. А.¹, Соломахо В. Л.²

¹Белорусский государственный институт метрологии

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе были проанализированы источники погрешностей средств измерений, используемых для определения размеров наночастиц, находящихся на подложке, в жидкости и в воздухе. На основании проведенного анализа была сформирована классификационная схема источников погрешностей, позволяющая проводить валидацию метрологических моделей не исключенной систематической погрешности измерений размеров наночастиц.

Ключевые слова: размер наночастиц, погрешность, метрологическая модель.

CLASSIFICATION SCHEME OF ERRORS IN MEASURING INSTRUMENTS USED FOR NANOPARTICLES ON A SUBSTRATE, IN LIQUID AND IN AIR

Bagdun A. A.¹, Solomakho V. L.²

¹Belarusian State Institute of Metrology

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The paper analyzes sources of errors in measuring instruments used to determine the sizes of nanoparticles on a substrate, in liquid, and in air. Based on the analysis, a classification scheme of error sources was formed. This allows validation of metrological models of non-excluded systematic error in measuring the sizes of nanoparticles.

Key words: nanoparticle size, error, metrological model.

Адрес для переписки: Багдюн А. А., Старовиленский тракт, 93, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: bagdun.ne@gmail.com

Ключевым фактором метрологического обеспечения измерений размеров наночастиц является обеспечение их прослеживаемости, которая невозможна без теоретико-экспериментальной оценки точности измерений. Для решения этой задачи необходимо комплексно проанализировать источники погрешностей и провести их оценку.

Оценивать точность измерений наночастиц эталонным оборудованием необходимо по методике, принятой для всех национальных эталонов Республики Беларусь, т.е. в соответствии с «Правилами разработки, утверждения, модернизации и содержания национальных эталонов единиц величин».

Для национальных эталонов устанавливаются следующие характеристики точности:

- неисключенная систематическая погрешность эталона θ_{sist} ;
- случайная погрешность эталона S ;
- погрешность передачи размера единицы величины S_{Σ} .

Для расчета неисключенной систематической погрешности средств измерений, используемых для наночастиц, находящихся на подложке, в жидкости и в воздухе, необходимо установить источники погрешностей, оказывающие на нее влияние. Зачастую, это – трудоемкая задача, требующая внимательного анализа и исследований, направленных на их установление и последующий расчет. Для оптимизации этого процесса и недопущения неучтенных

источников, была поставлена задача разработать классификационную схему, объединяющую источники погрешностей средств измерений, используемых для наночастиц, находящихся на подложке, в жидкости и в воздухе.

В [1] была разработана классификационная схема методов, используемых для измерений наночастиц. В соответствии с данной схемой методы измерений наночастиц подразделяются на два класса: индивидуальные, предназначенные для контроля отдельных частиц, и интегральные, или аналитические комплексные методы измерений, дающие информацию об ансамблях частиц.

Методы первого класса предполагают формирование распределения частиц по размерам из набора независимых измерений размера каждой отдельной частицы.

Ко второму классу относятся средства измерений, построенные на различных физических принципах как. Для методов данного класса, как правило, применяется принцип аддитивности сигналов отклика от отдельных частиц в предположении отсутствия их взаимного влияния. Интегральный сигнал от ансамбля частиц является основой для восстановления распределения частиц по размерам при опоре на определенные физические принципы.

В результате анализа, можно сформулировать, что комплексные методы измерений определяют

размер частиц путем расчета диаметра в соответствии с физическим принципом, используемым оборудованием, поэтому источники погрешностей, влияющие на неисключенную систематическую погрешность, заложены в уравнении расчета. Проанализировав уравнения, мы выделили следующие классы погрешностей:

- погрешности, обусловленные конструкцией применяемых средств измерений;
- погрешности, обусловленные точностью определения констант;
- погрешности, обусловленные точностью определения справочных данных.

Класс погрешности, обусловленной конструкцией применяемого средства измерения, состоит из источников, присущих конкретному средству измерения, и не может быть унифицирован для всех методов, однако его необходимо обозначить для облегчения поиска источников.

Индивидуальные методы измерений определяют размер наночастиц непосредственно измерением каждой отдельной частицы, поэтому добавляются дополнительные источники погрешностей. К ним относятся погрешности, обусловленные свойствами измеряемого объекта (наночастицы). Однако, все вышеперечисленные классы, также присущи индивидуальным методам.

Также отдельно стоит упомянуть погрешности, обусловленные измерением условий окружающей среды (температура, влажность, давление и т. д.). Эти источники относятся к классу погрешностей, обусловленных конструкцией применяемых средств измерений, и присущи каждому методу измерения.

В результате классификации была разработана классификационная схема источников погрешностей для различных типов средств измерений, используемых для наночастиц, находящихся на подложке, в жидкости и воздухе, представленная на рисунке 1.

После создания классификационной схемы, были проанализированы источники погрешностей, выявленные в работах [2–4]. По результатам анализа выяснилось, что классификационная

схема также является отличным валидационным инструментом анализа метрологических моделей источников погрешностей измерения размеров наночастиц, позволяющая оптимизировать данный процесс.



Рисунок 1 – Классификационная схема источников погрешностей для различных типов средств измерений, используемых для наночастиц, находящихся на подложке, в жидкости и воздухе

Литература

1. Соломахо, В. Л. Методы измерений наноразмерных частиц / В. Л. Соломахо, А. А. Багдюн // Приборостроение–2019: материалы 12-й Международной научно-технической конференции, 13–15 ноября 2019 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2019. – С. 246–248.
2. Solomakho, V. L. Determination of the Error in Transferring of Length Unit's Size when Measuring the Nanoparticles' Diameter Using an Analyzer of Particles' Differential Electrical Mobility / V. L. Solomakho, A. A. Bagdun // Приборы и методы измерений. – 2021. – Т. 12, № 3. – С. 194–201.
3. Багдюн, А. А. Определение погрешности измерения диаметра наночастиц методом динамического рассеяния света / А. А. Багдюн, В. Л. Соломахо // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2021. – № 4. – С. 32–37.
4. Багдюн, А. А. Расчет погрешности измерения диаметра наночастиц при использовании в качестве средства измерений наноизмерительной машины NMM-1 / А. А. Багдюн, В. Л. Соломахо // Метрология и приборостроение. – 2023. – № 2. – С. 21–28.

УДК 528.8

ЛЕТАЮЩАЯ ЛАБОРАТОРИЯ НА БАЗЕ КВАДРОКОПТЕРА DJI
Балухо И. Н., Дудчик Ю. И., Жукова М. Н., Кольчевский Н. Н.

НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Предложена летающая лаборатория на базе квадрокоптера DJI, решающая задачи обучающего и исследовательского характера, и практические задачи по разработке и внедрению в практику приборов и систем учета и контроля воздуха. Выполнены экспериментальные исследования по грузоподъемности квадрокоптера DJI Phantom 3, разработаны системы крепления измерительного оборудования и исследована устойчивость, и летные характеристики квадрокоптера, в зависимости от распределения дополнительных модулей. Разработаны и протестированы системы измерения концентрации углеводородных газов и пыли, давления и температуры, на основе микроконтроллера Arduino

Ключевые слова: квадрокоптеры; измерительная станция; DJI.

FLYING LABORATORY BASED ON DJI QUADROCOPTER
Balukho I., Dudchik Y., Zhukova M., Kolchevsky N.

A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems BSU
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Proposed flying laboratory based on DJI quadcopter, which solves educational and research tasks, and practical tasks for the development and implementation in practice of devices and systems of air metering and control. Performed experimental research on the load capacity of the DJI Phantom 3 quadcopter, developed systems for attaching measuring equipment and studied the stability and flight characteristics of the quadcopter, depending on the distribution of additional modules. Developed and tested systems for measuring the concentration of hydrocarbon gases and dust, pressure and temperature, based on Arduino microcontroller.

Key words: quadcopters; measuring station; DJI.

Адрес для переписки: Кольчевский Н. Н., ул. Курчатова 7, 403, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: kolchevsky@bsu.by

Современные тенденции определяют важность создания квадрокоптеров и систем на их основе. Для подготовки специалистов необходимы условия для обучения управлению квадрокоптером и разработке электронного оборудования. Современные измерительные комплексы представляют собой сложные системы, состоящие из большого числа радиотехнических устройств, взаимодействующие с вычислительными сетями и являются «генераторами» экспериментальной информации. Задача создания измерительных систем на базе квадрокоптеров с возможностью высотных статичных измерений является актуальной и перспективной. Измерительные системы могут использоваться для экологического мониторинга атмосферы. Для образовательных целей важными задачами являются: изучение принципов управления и полетов квадрокоптеров; установка и освоение мобильных приложений для пилотирования; обучение сборке, пилотированию и программированию дронов; практические полеты с анализом фото и видео информации местности; изучение принципов позиционирования квадрокоптеров и выполнение полетов в интеллектуальных режимах: по заданным точкам, направлениям, траекториям, на заданной высоте над рельефом; практические полеты с анализом показаний газоизмерительных датчиков; выполнение расчетов по определению координат квадрокоптера и показаний

измерительных датчиков; построение 2D и 3D моделей местности и карт загрязнений воздуха, анализирующие пространственное распределение значений физических параметров.

Предлагаемая летающая лаборатория решает, как задачи обучающего и исследовательского характера, требуемые при подготовке специалистов-разработчиков современных высокотехнологичных средств измерения, так и чисто практические задачи по разработке и внедрению в практику приборов и систем учета и контроля воздуха.

Квадрокоптер DJI Phantom 3 [1] использовался в качестве носителя исследовательского оборудования. Общее время зарядки аккумулятора квадрокоптера составляет 1 час, в сравнении с заявленными 1 час 30 мин. Зарядки пульта управления квадрокоптером DJI Phantom 3 Advanced хватает на 12 вылетов по 23 минуты, т. е. время работы пульта составляет около 5 часов. При использовании 5 батарей и станции зарядки батарей можно осуществлять непрерывные полеты в течение 4–5 часов, что достаточно для образовательного процесса. Исследования грузоподъемности показали, что квадрокоптер DJI Phantom 3 может нести до 500 грамм полезной нагрузки, в качестве которой предложено использовать небольшие автономные модули. Разработаны системы крепления измерительного оборудования массой 100–200 грамм и исследована устойчивость, и летные

характеристики квадрокоптера, в зависимости от распределения дополнительных модулей. На рисунке 1 показана система квадрокоптера с лазерным модулем, создающим периодическую сетку лучей. Лазерный модуль позволяет решать как задачи лазерного зондирования атмосферы, так и задачи восстановления формы поверхности по ослаблению, рассеянию или изменению формы лазерного пятна.

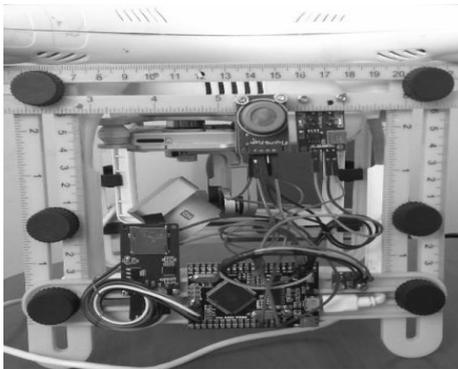
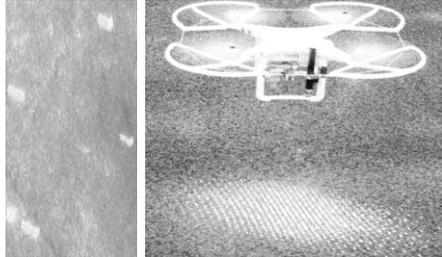


Рисунок 1 – Квадрокоптер с лазерным и измерительными модулями

Разработаны и протестированы системы измерения концентрации углеводородных газов и пыли, давления и температуры, на основе микроконтроллера Arduino ATmega, с функцией накопления данных на электронные носители. В качестве детекторов использовались электрохимические датчики серии MQ, регистрирующие широкий класс углеводородных газов с концентрациями от 200 до 1000 ppm [2], лазерные датчики для измерения концентрации твердых частиц PM_{2,5} PM₁₀ с концентрацией до 999 мкг/м³ и с разрешением от 0,3 мкг/м³, датчики давления (рисунок 2), температуры и влажности [3].

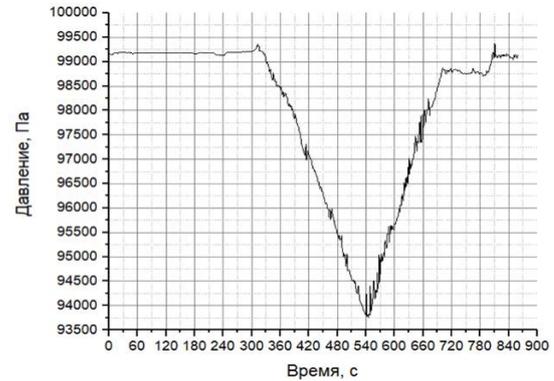


Рисунок 2 – Зависимость показаний датчика давления от времени полета

Для анализа экспериментальных данных, необходимо связать показания датчиков с параметрами полета квадрокоптера. Это можно сделать, путем синхронизации часов измерительного модуля с часами квадрокоптера или измеряя атмосферное давление. Атмосферное давление и температура уменьшаются с увеличением высоты, и по ним можно доопределять высоту квадрокоптера (рисунок 2). Таким образом, глобальный минимум давления определяет максимальную высоту квадрокоптера. Выбирая ее как точку отсчета, восстанавливаются показания экспериментальных датчиков в зависимости от высоты квадрокоптера. Использование разных комбинаций измерительных датчиков можно сформировать измерительные системы с требуемой чувствительностью к свойствам воздушной среды.

Литература

1. Официальный сайт компании DJI [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dji.com>.
2. Measuring station based on drone DJI phantom / N. N. Kolchevsky // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы VII международной науч.-практ. конф., посвященной 120-летию со дня рождения академика Антона Никифоровича Севченко, 18–19 мая 2023 г., Минск. – Минск, 2023. – С. 417–418.
3. Применение квадрокоптера Phantom 3 в качестве измерительной лаборатории / М. Н. Кольчевская // Математические методы в технике и технологиях. – ММТТ: Т. 12–3, 2019. – С. 22–28.

УДК 004.932, 528.8

РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПОМОЩИ КВАДРОКОПТЕРА DJI PHANTOM

Балухо И. Н., Дудчик Ю. И., Жукова М. Н., Кольчевский Н. Н.

НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Предложены методы распознавания объектов на изображениях, полученных при помощи квадрокоптера DJI PHANTOM. Рассмотрено применение цифровых фильтров относительно снимков для улучшения качества изображений и лучшего распознавания объектов. Рассмотрено применение квадрокоптера DJI PHANTOM для распознавания объектов в сельском хозяйстве. Исследованы идентификационные признаки объектов на изображениях, полученных квадрокоптером.

Ключевые слова: распознавание объектов, квадрокоптеры, DJI.

RECOGNIZING OBJECTS IN DJI PHANTOM QUADCOPTER IMAGES

Balukho I., Dudchik Y., Zhukova M., Kolchevsky N.

A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems BSU
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Proposed methods of recognizing objects on images obtained by DJI PHANTOM quadcopter. Considered the application of digital filters to images to improve image quality and better recognition of objects. Considered the application of DJI PHANTOM quadcopter for recognizing objects in agriculture. Analysed the identification features of objects in the images obtained by the quadcopter.

Key words: object recognition, quadcopters, DJI.

Адрес для переписки: Кольчевский Н. Н., ул. Курчатова 7, 403, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: kolchevsky@bsu.by

Особенностью квадрокоптеров является возможность контролируемого полета и зависания в точке с заданными GPS координатами, управление режимами и параметрами цифровой съемки, возможность предварительного удаленного просмотра изображений. Квадрокоптер, оснащенный цифровой камерой способен в течении часа создавать несколько гигабайт данных, в виде тысячи фото или видео высокого разрешения. Достоинством модели DJI Phantom 3 является штатная камера GoPro 4K [1], способная вести качественную цифровую аэрофото- и видеосъемку, на заданной высоте и траектории полета. Обработка фото/видео материала на компьютере, в программных пакетах, позволяет строить карты местности, проводить измерения расстояний и высот, и анализ различных объектов. Преимущества цифровых изображений связаны с применением компьютерных средств, представляющих уникальные возможности обработки и анализа данных, и возможность обрабатывать большие объемы данных. Невысокая стоимость и цена обслуживания квадрокоптеров, по сравнению с пилотируемой авиацией и традиционной наземной техникой, повышает значимость и актуальность исследований и работ на основе квадрокоптеров.

Дешифрирование, распознавание, интерпретация и анализ фото и видео данных являются важнейшей задачей применения квадрокоптеров [2]. Цифровые высотные изображения имеют ряд особенностей: время цифрового снимка составляет миллисекунды, диапазон чувствительности,

кроме видимого спектра, охватывает ближние ИК и УФ-диапазоны, невидимые человеческого глаза, глубина цвета характеризует количество дискретных цветов (24 битный цвет кодирует RGB каналы 8 битами, что составляет 16 777 216 цветов), пиксельный или точечный характер изображения (пример изображений показан на рисунке 1, размер пикселя определяется условиями получения изображения, таблица 1 [3]), как правило, прямоугольного изображения, например, 4000 на 3000 пикселей, что позволяет цифровыми методами изменять масштаб изображений.

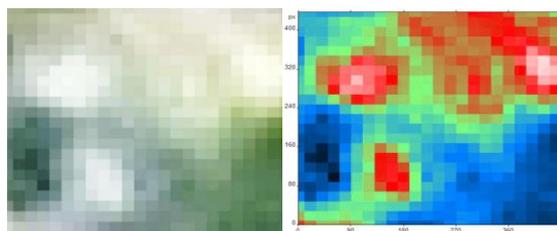


Рисунок 1 – Пиксельный характер цифрового изображения деревьев

Таблица 1 – Цифровой масштаб изображений

Высота квадрокоптера, м	Размер 1-го пикселя, м	Площадь 1-го пикселя, м ²	Площадь снимка 4000 на 3000 пикселей, м ²
100	0,33	0,11	1,3 10 ⁶
200	1,3	1,7	20 10 ⁶
300	1,7	2,9	35 10 ⁶
400	2,0	4,0	48 10 ⁶

Изображения квадрокоптера хранят информацию о времени и месте съемки (GPS координаты: широта, долгота, высота), режиме съемки (диафрагма, выдержка, ISO, экспокоррекция, фокусное расстояние, светосила, экспозамер, режим фотовспышки). К полученным изображениям применяются цифровые фильтры для улучшения качества (подавление шумов, цветокоррекция, контраст, яркость, резкость, насыщенность, баланс белого и т. д.).

Пиксельный характер изображения и «вид сверху» имеют необычный ракурс, что затрудняет идентификацию объектов.

В сельском хозяйстве объектами контроля и распознавания могут быть поля, дороги, посевы, животные, сельхозтехника, в лесном хозяйстве – деревья, поляны, озера, дикие животные, птицы, в градостроительстве – промышленные предприятия, здания, жилые комплексы, стадионы, парки, дороги, автотранспорт, объекты энергетики, в социальной сфере – люди, общественные мероприятия, и т. д. Многие объекты крайне затруднительно идентифицировать при съемке с помощью квадрокоптера: насекомые и мелкие животные, воздушные загрязнения, в связи с малым размером (менее одного пикселя) или незначительности отраженного/рассеянного излучения для выделения на фоне соседних пикселей. Некоторые идентификационные признаки объектов показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Идентификационные признаки объектов на изображениях, полученных квадрокоптером

Изображение	Размер	Объект - Признак
	0,33м	Человек Заметно большей площадью обладает тень человека, объект движется при сравнении близких снимков. Не наблюдается лицо, т.е. сложно (невозможно) идентифицировать личность.
	1-20м	Дорога Однотонность цвета, протяженность по всей фотографии, геометрическая правильность, контрастные разделительные линии, наличие на дороге однотипных движущихся объектов.

Литература

1. Официальный сайт компании DJI [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dji.com>.
2. Шалькевич, Ф. Е. Методы аэрокосмических исследований: курс лекций / Ф. Е. Шалькевич. – Мн.: БГУ. – 2005. – 161 с.
3. Flying measuring station based on drone dji phantom / N. N. Kolchevsky // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы VII международной науч.-практ. конф., посвященной 120-летию со дня рождения академика Антона Никифоровича Севченко, 18–19 мая 2023 г., Минск. – Минск, 2023. – С. 417–418.

УДК 535.241

КОМПЛЕКС «ИК-КАМЕЯ»

Беляев Ю. В., Литвинович Г. С., Цикман И. М., Попков А. П.

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

Аннотация. В работе представлены результаты разработки комплекса для исследования и определения параметров аппаратуры дистанционного зондирования ИК диапазона. Представлен состав, краткое описание и основные характеристики комплекса.

Ключевые слова: ИК диапазон, оптические характеристики, поляризатор, детектор, абсолютно черное тело, монохроматор, диффузный излучатель.

«ИК-KAMEYA» COMPLEX

Beliaev Y., Litvinovich H., Tsykman I., Popkov A.

*A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The paper presents the results of developing a complex for studying and determining the parameters of IR remote sensing equipment. The composition of the complex is presented, a brief description and main characteristics of its constituent blocks are given.

Keywords: IR range, optical characteristics, polarizer, detector, black body, monochromator, diffuse emitter.

*Адрес для переписки: Литвинович Г. С., ул. Курчатова 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: litvinovichgs@yandex.by*

Многоспектральные оптические приборы инфракрасного (ИК) диапазона длин волн от 1 до 10 мкм, используемые в нашей стране в настоящее время, имеют различное назначение: гидрометеорологическое, природно-ресурсное, для мо-

нитинга чрезвычайных ситуаций, для экологического мониторинга и т. д., обеспечивают отечественных потребителей независимыми данными дистанционного мониторинга с авиационной и космической платформ [1].

Комплекс «ИК-Камея» предназначен для исследования спектрально-поляризационных параметров аппаратуры ИК-диапазона длин волн от 1 до 10 мкм, для наладки и градуировки спектральных приборов дистанционного мониторинга наземного и аэрокосмического базирования.

В состав комплекса входят блоки: диффузного излучателя; монохроматического излучателя; эталонного излучателя – высокотемпературное абсолютно черное тело (АЧТ); эталонного излучателя – низкотемпературное АЧТ; поляризации излучения; регистрации излучения.

Комплекс «ИК-Камея» используется для получения излучения с требуемым спектральным диапазоном и с определенной поляризацией в диапазоне длин волн от 1 до 10 мкм.

Блок диффузного излучателя служит источником сплошного ИК диффузного излучения в спектральном диапазоне 1–10 мкм длин волн. Диффузный излучатель выполнен на основе позолоченной фотометрической сферы диаметром 200 мм с двумя входными портами для ввода излучения и одного выходного порта диаметром 50 мм. Источниками освещения «золотой» фотометрической сферы являются нагретая постоянным током светящаяся спираль или ИК-светодиод. Спираль изготавливалась путем намотки проволоки из нихрома марки Х20Н80 диаметром 0,2 мм на керамический сердечник. ИК-светодиоды питаются импульсным током с частотой около 2 кГц.

Блок монохроматического источника излучения конструктивно состоит из монохроматора и его системы освещения.

Монохроматор МДР-23 используется для выделения из сплошного спектра ИК-излучения узких монохроматических линий. Для работы в ИК-диапазоне в монохроматоре МДР-23 используется дифракционная решетка, имеющая 75 штрихов/мм.

Система освещения монохроматора включает источник инфракрасного излучения сплошного спектра и систему зеркал. В качестве источника ИК излучения сплошного спектра используется нихромовая (марки Х20Н80) лента шириной 3 мм, нагреваемая током в 14 А (используется источник постоянного тока СРХ 400 DP). Система зеркал фокусирует изображение участка ленты на входную щель монохроматора и состоит из плоского размером 30×30 мм и вогнутого диаметром 50,8 мм и фокусным расстоянием 152,4 мм зеркал. Эти зеркала имеют золотое напыление для уменьшения потерь на отражение в рабочей ИК-области спектра.

Высокотемпературное АЧТ и низкотемпературное АЧТ являются источниками равновесного теплового излучения с диапазонами воспроизводимых температур от минус 30°С до плюс 1100°С.

Высокотемпературное АЧТ – модель абсолютно черного тела АЧТ-45/100/1100 второго ряда, предназначен для настройки и градуировки средств бесконтактного измерения температуры в

диапазоне температур от 300 до 1100°С в лабораторных условиях.

Низкотемпературное АЧТ – модель абсолютно черного тела «Деметра», предназначен для настройки и градуировки средств бесконтактного измерения температуры (пирометров и измерительных тепловизоров) в диапазоне температур от минус 30°С до плюс 80°С в лабораторных условиях.

Поляризационные измерения в заданном спектральном диапазоне ИК-области длин волн необходимы для контрастирования различных объектов, сливающихся с фоном. Блок поляризации излучения комплекса изготовлен на основе поляризатора – призмы Рошона, изготовленной из фторида магния MgF_2 , и системы поворота призмы на заданные углы. Шаговый двигатель системы поворота устанавливает ось поляризации кристалла в трех положениях 0°, 45°, 90° от базового направления.

Блок регистрации излучения служит для детектирования и оценки интенсивности ИК-излучения. Он выполнен на основе одноэлементных детекторов РVI-4ТЕ-5-1×1 на диапазоны 2,7–5,2 мкм и РVI-3ТЕ-10.6-0,5×0,5 на диапазон 3–12 мкм. Спектрально-анализатор представляет собой охлаждаемый HgCdTe-детектор со сменными интерференционными светофильтрами соответствующего диапазона с шириной линии пропускания 100–500 нм в зависимости от поддиапазона.

В качестве моторизованной поворотной платформы блока регистрации (компаратора) использована платформа Standa 8MR190-90-59.

Все блоки комплекса «ИК-Камея» располагаются на горизонтальной оптической плите.

Технические характеристики комплекса «ИК-Камея» приведены в таблице.

Таблица – Технические характеристики комплекса «ИК-Камея»

Спектральный диапазон, мкм	1,0 – 10,0
Коэффициент отражения покрытия «золотой» фотометрической сферы в области 1,0–10,0 мкм, %	не менее 96
Диаметр входной апертуры приборов дистанционного мониторинга, мм	не более 50

Из-за невысокого ресурса высокотемпературного АЧТ, в качестве рабочего эталона спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) используется диффузный излучатель на основе фотометрической сферы. Калибровка комплекса для переноса единицы СПЭЯ с АЧТ на диффузный излучатель, выполненный на основе «золотой» фотометрической сферы, выполняется методом компарирования. При этом на поворотную платформу устанавливается блок регистрации – компаратор, сличающий сигнал в определенных спектральных поддиапазонах. Вокруг поворотной платформы с компаратором последовательно по окружности устанавливаются источники эталонного излучения – высокотемпературное АЧТ и низкотемпературное АЧТ, и калибруемый диффузный излучатель.

Компаратор регистрирует поочередно излучение от эталонов и от диффузного излучателя (ДИ) в каждом из спектральных каналов. Затем вычисляется СПЭЯ рабочего эталона по следующей формуле:

$$L_{\text{ДИ}}(\lambda) = \frac{V_{\text{ДИ}}^{\text{СИГН}} - V_{\text{ДИ}}^{\text{ТЕМН}}}{V_{\text{Э}}^{\text{СИГН}} - V_{\text{Э}}^{\text{ТЕМН}}} \cdot \int L_{\text{Э}}(\lambda) R(\lambda) S(\lambda) d\lambda,$$

где $V_{\text{ДИ}}^{\text{СИГН}}$, $V_{\text{Э}}^{\text{СИГН}}$ – сигнал от ДИ и эталона; $V_{\text{ДИ}}^{\text{ТЕМН}}$, $V_{\text{Э}}^{\text{ТЕМН}}$ – темновой (шумовой) сигнал, регистрируемый при закрытой входной апертуре компаратора при измерении сигналов от ДИ и эталона; $L_{\text{Э}}(\lambda)$ – СПЭЯ эталона; $R(\lambda)$ – пропускание фильтра на длине волны λ ; $S(\lambda)$ – спектральная чувствительность детектора на длине волны λ .

Комплекс предоставляет возможность определять спектральную чувствительность, спектральный диапазон калибруемого средства измерения, коэффициент пропускания материалов, а также проводить калибровки спектральных приборов по СПЭЯ.

Комплекс разработан в рамках задания «Разработать и изготовить комплекс для определения спектрально-поляризационных параметров аппаратуры ДЗЗ в ИК-диапазоне» подпрограммы «Оборудование для перспективных научных исследований» ГНТП «Национальные эталоны и высокотехнологичное исследовательское оборудование».

Литература

1. Сизиков, А. С. Способы повышения эффективности авиационного мониторинга чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера с использованием технических средств дистанционного зондирования Земли / А. С. Сизиков, Ю. В. Беляев, И. М. Цикман // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 1 (78). – С. 52–62.
2. Комплекс для определения спектрально-поляризационных параметров аппаратуры дистанционного зондирования Земли в ИК-диапазоне / А. С. Сизиков [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2024. – № 1 (55). – С. 31–39.

УДК 616-78

СНИЖЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОИМПЕДАНСНЫХ СПЕКТРОВ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Бразовская Н. Г., Бразовский К. С., Конев А. В.

*Сибирский государственный медицинский университет,
Томск, Российская Федерация*

Аннотация. Электроимпедансная спектроскопия (ЭИС) играет важную роль в исследованиях электрических свойств биологических объектов, позволяя оценивать параметры жизнеспособности тканей и отдельных клеток в реальном времени. Несмотря на относительную простоту технической реализации измерительного тракта, в многоканальных электроимпедансных приборах существует проблема межканального прохождения сигнала, приводящая к повышению погрешности измерений. В работе представлен один из возможных подходов к снижению влияния межканальных помех на основе нейросетевого моделирования измерительного тракта с последующим адаптивным вычислением матрицы коррекции исходных измерений.

Ключевые слова: электроимпедансная спектроскопия, коррекция погрешностей, межканальное прохождение сигнала.

REDUCING THE MEASUREMENT UNCERTAINTY OF ELECTRICAL IMPEDANCE SPECTRUM OBTAINED FROM BIOLOGICAL OBJECTS

Brazovskaya N., Brazovskii K., Konev A.

*Siberian State Medical University
Tomsk, Russian Federation*

Abstract. Electrical impedance spectroscopy (EIS) plays an important role in measuring the electrical properties of biological objects. EIS allows studying liability of tissues and cells in real time. Despite the relative simplicity of the hardware part, multichannel EIS suffers from interchannel interferences that significantly increase the uncertainty of the measurements. The present paper describes a possible approach to reduce this uncertainty based on an adaptive neural network model of the hardware to approximate the correction matrix.

Key words: electrical impedance spectroscopy, error correction, interchannel interferences.

*Адрес для переписки: Бразовский К. С., Московский тракт 2/7, г. Томск 634050, Российская Федерация
e-mail: bks_2005@mail.ru*

Электроимпедансная спектроскопия биологических объектов применяется для исследования параметров жизнеспособности органов, тканей и отдельных клеток, поскольку удельная проводимость и диэлектрическая проницаемость биологических структур непосредственно связаны с их целостностью и функциональным состоянием. В

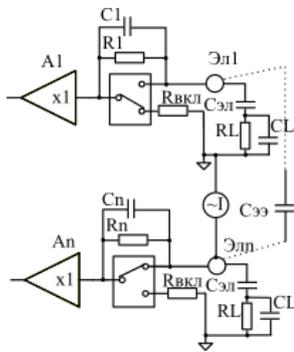
случае многоканальных электроимпедансных измерений появляется возможность реконструировать трехмерное пространственное распределение электрических параметров изучаемых объектов (метод электроимпедансной томографии).

К сожалению, при многоканальных измерениях появляется характерный вид погрешности

измерений, обусловленный межканальным прохождением сигнала. На рисунке 1 представлена упрощенная электрическая схема измерительной системы многоканального прибора для широкополосной электроимпедансной спектроскопии. Причина появления межканальных помех связана с прохождением сигнала через RC -цепи $R1C1$, $RnCn$ и паразитную межэлектродную емкость $C_{\text{ЭЭ}}$.

К сожалению, значения импеданса элементов коммутации варьируются в широких пределах (более 10 %) даже в рамках одной партии электронных компонентов. Ранее были предложены активные схемы коррекции паразитных параметров [1], однако снижение уровня межканальных помех достигается за счет значительного усложнения аппаратной части.

Из формулы (1) следует, что величина межканальных помех зависит от импеданса нагрузки и, как следствие, не может быть учтена и скорректирована как систематическая ошибка.



$A1, A_n$ – входные буферные каскады;
 $C1, R1$ – проходная емкость и сопротивление ключа канала 1 в выключенном состоянии; C_n, R_n – для канала n ; $R_{\text{вкл}}$ – сопротивление открытого ключа;
 $\text{Эл}1, \text{Эл}n$ – биоэлектроды; $C_{\text{ЭЭ}}$ – емкость интерфейса электрод-биообъект; R_L, C_L – активная и емкостная составляющие импеданса биообъекта; $\sim I$ – источник зондирующего тока

Рисунок 1 – упрощенная электрическая схема входного модуля многоканального измерителя импеданса

Без учета межканального прохождения сигнал на выходе усилителя A_i при подключенном источнике зондирующего тока равен

$$U_i = I \cdot Z_i;$$

$$Z_i = (R_L \parallel \frac{1}{2\pi f C_L}) + \frac{1}{2\pi f C_{\text{ЭЭ}}}, \quad (1)$$

где I – величина зондирующего тока; f – частота; Z_i – эквивалентная величина импеданса, измеряемая в i канале. Влияние межканальной помехи проявляется в виде параллельного соединения эквивалентных импедансов в каналах Z_i и Z_j через паразитную емкость $C_{\text{ЭЭ}}$:

$$Z^* = Z_i \parallel Z_j + \frac{1}{2\pi f C_{\text{ЭЭ}}}.$$

Один из очевидных способов снижения межканальной помехи состоит в уменьшении

паразитной межэлектродной емкости, однако на практике ее значения составляют десятки пикофарад, что вносит значительные погрешности на высоких частотах зондирующего тока.

Предлагаемый нами способ уменьшения перекрестной помехи основан на представлении сигнала на выходе усилителя A_i в виде линейной комбинации полезного сигнала и суммы межканальных помех:

$$U = AIZ;$$

$$u_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} I_j z_j, i \neq j, \quad (2)$$

где u_i – выходной сигнал i канал, n – количество каналов, a_{ij} – весовые коэффициенты взаимовлияния каналов i и j , I_j – величина зондирующего тока в канале i .

В простейшем случае постоянных коэффициентов a_{ij} устранить межканальные помехи можно умножением измеренных значений на матрицу, обратную A :

$$U^* = A^{-1}U,$$

однако в реальных условиях большинство параметров эквивалентной электрической схемы известны лишь приближенно. Более того, величина межканальной помехи зависит от измеряемого импеданса биологического объекта и качества контакта электродов. Как следствие, система (2) становится нестационарной, а корректирующая матрица должна вычисляться для каждой новой серии измерений. В том случае, когда межканальные помехи можно рассматривать как некоррелированные сигналы малой амплитуды, задачу снижения погрешности в многоканальных системах для электроимпедансной спектроскопии можно свести к разделению линейной комбинации сигналов на линейно независимые компоненты [2]:

$$\text{cov}(A^{-1}U) = E, \quad (3)$$

где $\text{cov}(A^{-1}U)$ – ковариационная матрица преобразованных измерений, E – единичная матрица.

Ранее подобный подход применялся для разделения сигналов сердца и легких в электроимпедансной томографии. Одна из проблем реализации предлагаемого подхода на практике состоит в том, что прямое применение выражения (3) возможно только в очень ограниченном количестве случаев, когда измерения представлены квадратной и невырожденной матрицей. Однако в подавляющем большинстве случаев матрица измерений переопределена (количество измерений значительно больше количества физических каналов) и плохо обусловлена.

Проведенное нами численное моделирование с использованием синтетических и реально измеренных значений позволило установить, что наилучшие результаты достигаются при аппроксимации корректирующей матрицы адаптивной нейросетевой моделью, структура которой определяется конкретным схемотехническим

решением измерительного тракта, а коэффициенты адаптивно изменяются в процессе обработки измеренных значений.

Например, для измерителя импеданса с последовательной архитектурой, содержащего 16 каналов и работающего в полосе частот от 10 кГц до 1 МГц в режиме широкополосного зондирования [3], нейронная сеть содержит входной и выходной слои из 16 нейронов, а также два скрытых слоя, количество нейронов в которых составляет от 16 до 128. Предварительное обучение нейросети осуществляется на «идеальных» синтетических данных с нулевым значением межканального прохождения. При обработке измеренных значений производится адаптация нейросети для получения ковариационной матрицы, максимально близкой к единичной.

Проведенные численные исследования позволили установить принципиальную возможность

снижения уровня межканальных помех на 8–12 Дб на частотах зондирующего тока до 1 МГц и полном сопротивлении исследуемого биологического объекта до 1 кОм.

Литература

1. A 122 fps, 1 MHz Bandwidth Multi-Frequency Wearable EIT Belt Featuring Novel Active Electrode Architecture for Neonatal Thorax Vital Sign Monitoring / Wu Y. [et al.] // IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems. – 2019. – V. 13, № 5. – P. 927–937.
2. Extraction of cardiac and respiration signals in electrical impedance tomography based on independent component analysis / T. Rahman [et al.] // Journal of Electrical Bioimpedance. – 2013. – Sciendo. – V.4, №. 1. – P. 38–44.
3. Бразовский, К. С. Устройство для измерения электрических параметров биологических тканей при криодеструкции / К. С. Бразовский, Е. С. Королюк // Медицинская техника. – 2020. – № 6 (324). – С. 24–27.

УДК 620.179.14/15

ПРИМЕНЕНИЕ НЕОДИМОВЫХ МАГНИТОВ В УСТАНОВКЕ ДЛЯ МАЛОЦИКЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ

Бусько В. Н.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Для повышения эффективности и достоверности механических малоцикловых испытаний, расширения функциональных возможностей испытательной техники в качестве силовых элементов в экспериментальной установке предложено использовать мощные постоянные неодимовые магниты. Система нагружения испытуемого при изгибе консольно закрепленного образца для создания в нем напряжений основана на попеременном притяжении его свободного конца к неодимовым магнитам, обладающим высокой постоянной во времени магнитной энергией, превышающей все другие материалы. Преимуществом способа на основе применения неодимовых магнитов является отсутствие влияния механического воздействия на образец и относительно простая реализация метода. Испытания показали возможность и эффективность данного способа создания напряжений в испытуемом образце и исследования усталостной прочности и деградации.

Ключевые слова: механические испытания и испытательная техника, малоцикловая усталость, постоянные неодимовые магниты.

APPLICATION OF NEODYMIUM MAGNETS IN THE INSTALLATION FOR LOW-CYCLE TESTS OF STEEL SPECIMENS IN FATIGUE STRENGTH RESEARCH

Busko V.

*Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. To increase the efficiency and reliability of mechanical low-cycle tests and to expand the functional capabilities of testing equipment, it is proposed to use powerful permanent neodymium magnets as force elements in the experimental setup. The system of loading of a cantilever fixed specimen under test in bending to create stresses in it is based on alternate attraction of its free end to neodymium magnets possessing high time constant magnetic energy exceeding all other materials. The advantage is the absence of mechanical influence on the sample and relatively simple realization of the method. Tests have shown the possibility and efficiency of this method of stress creation in the test specimen and fatigue strength and degradation studies.

Key words: mechanical testing and test engineering, low cycle fatigue, permanent neodymium magnets.

*Адрес для переписки: Бусько В. Н., ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: busko@iapf.bas-net.by*

Для изучения и оценки усталостной прочности (УП) стальных образцов материалов необходимым условием является проведение предварительных механических испытаний. Как правило, усталостные мало- и многоцикловые испытания

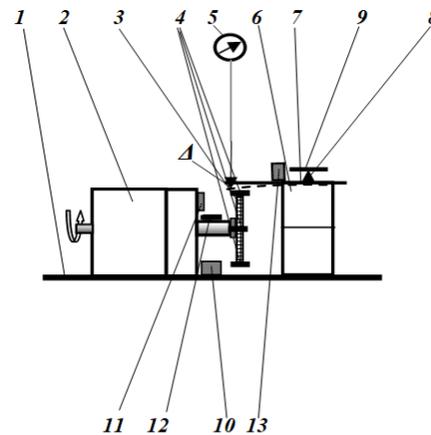
образцов, по-прежнему, проводятся на разных типах классических испытательных машин, стендах-установках и устройствах [1–3]. Принцип их действия основан на использовании кинематической схемы при консольном или чистом изгибе

образца с применением разных кривошипных механизмов, шатунов, вибраторов, гидроцилиндров, пружин, рычагов [1, 2], подшипников качения [3] и других узлов, имеющих с образцом механический контакт. Недостатком при использовании в качестве силовозбудителей (силовых элементов) для создания в образце напряжений является их вибрационно-акустическое воздействие на образец, обусловленное механическим контактом, которое может вызвать изменение (в основном, снижение) физико-механических свойств (ФМС), в т. ч., усталостной прочности. Сложность реализации при регулировании амплитуды нагружения, дороговизна и массогабариты такого оборудования, большие временные затраты при его переналадке под размеры малых образцов (например, аддитивных материалов) ограничивают применение подобных машин и снижают их функциональные возможности, достоверность и производительность механических испытаний.

Цель работы – для установки при малоцикловых испытаниях при изгибе образца разработать, создать и апробировать методику создания в образце напряжений, основанную на взаимодействии магнитного поля от постоянных неодимовых магнитов и стального образца.

Сущность предлагаемого решения для повышения достоверности и производительности механических испытаний, и исследования УП образцов состоит в том, что установка для его реализации (рисунок 1) содержит: станину, размещенный на ней электродвигатель (ЭД) с редуктором, установленный на его валу стальной диск с расположенными на нем силовозбудителями в виде неодимовых (сплав неодима Nd , бора B и железа Fe) четырех магнитов, закрепленный на корпусе ЭД геркон, ферритовый постоянный магнит для его срабатывания, плоский образец и индикатор его прогиба, призму, на которой размещен образец, прижимную пластину, электронный счетчик числа оборотов вала ЭД и преобразователь Баркгаузена (ПБ). Каждый магнит крепится на образующей стального диска (рисунок 2) нормально относительно плоскости образца для обеспечения максимальной силы притяжения, образец установлен на призме вытянутой формы и фиксируется к основанию прижимной пластиной. Для регулирования величины прогиба и силы притяжения свободного конца образца на каждом неодимовом магните закреплена изолирующая износоустойчивая прокладка, толщина которой определяется экспериментально. При вращении стального диска с магнитами изгибающий момент P в образце при притяжении к магнитам создается путем воздействия магнитных полей магнитов на образец. В результате при изгибе образца возникают напряжения с амплитудой σ , пропорциональные P , величине прогиба Δ и параметрам магнитов. Применение неодимовых магнитов в роли

силовозбудителей, например, вместо подшипников качения, позволило упростить схему создания в образце напряжений при изгибе и обеспечить возможность их регулирования без нанесения ущерба образцу.



1 – станина; 2 – ЭД с редуктором; 3 – стальной диск; 4 – неодимовые магниты; 5 – индикатор прогиба образца; 6 – основание; 7 – образец; 8 – призма; 9 – прижимная пластина; 10 – счетчик оборотов; 11 – геркон; 12 – ферритовый магнит для его срабатывания; 13 – преобразователь Баркгаузена (датчик)

Рисунок 1 – Схема узла в установке с неодимовыми магнитами для создания напряжений в образце

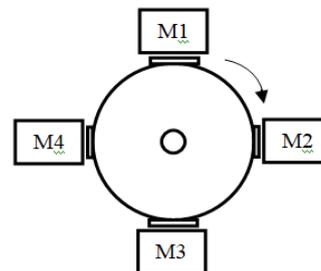


Рисунок 2 – Фронтальное расположение постоянных неодимовых магнитов ($M1$, $M2$, $M3$, $M4$) на стальном вращающемся диске

Работа установки заключается в том [4], что испытуемый на малоцикловую (число циклов нагружения $N \leq 10^{4-5}$ циклов) усталость образец (толщина до $\approx 1,0-1,2$ мм) устанавливают на основание с призмой вытянутой формы и сверху закрепляют прижимной пластиной. Свободный конец образца до нагружения находится в нейтральном положении, т.к. на него не действует изгибающий момент. При включении ЭД и вращении диска с помощью размещенных на нем магнитов $M1-M4$ (рисунок 2) за счет поочередного притяжения, в образце возникает изгибающий момент P , зависящий, в основном, от магнитной энергии и размеров каждого магнита в отдельности. Магниты закреплены на образующей диска вдоль осевого (аксиального) направления магнитного поля.

Применялись неодимовые магниты прямоугольной формы, при этом магнитная энергия в системе «магнит-образец», наряду с формой в виде диска, достигает своего максимального значения. При притяжении образца попеременно к каждому магниту с различной мощностью, в нем создаются изгибные напряжения растяжения/сжатия (в зависимости от положения образца) с возможностью регулирования амплитуды напряжений. Для регулирования Δ и σ , силы притяжения между образцом и магнитами, и для минимизации влияния возможного трения между ними, на последние устанавливают дополнительно изолирующую прокладку. Размеры применяемых в установке неодимовых магнитов составляли $20 \times 10 \times 2$ мм. Прогиб Δ измерялся индикатором прогиба образца часового типа или электронным штангенциркулем с учетом заданного алгоритма нагружения, пересчет в значения создаваемых напряжений σ (в МПа) производился по формулам сопромата. При необходимых значениях N образец освобождался от прижимной пластины и ПБ измерялся уровень магнитошумового сигнала в выбранной точке и стороне образца, который зависит от Δ , f , N и ФМС, Построив и проанализировав зависимости уровня сигнала от них, оценивается влияние малоциклового нагружения на УП образца. Использовался однофазный реверсивный электродвига-

тель типа РД-09 с коэффициентом передачи (редукцией), равным $1/137$ с частотой вращения вала двигателя $n = 8,8$ об/мин ($f = 0,15$ Гц), что позволяет создавать в образце не только упругие, но и пластические деформации.

Испытания установки и способа создания напряжений при изгибе на примере образца из электротехнической стали размером $100 \times 30 \times 0,6$ мм с применением 4-х мощных неодимовых магнитов в качестве силовозбудителей показали возможность их использования в установке в лабораторных условиях при малоцикловых испытаниях, исследовании и оценке УП стальных образцов.

Литература

1. Школьник, Л. М. Методика усталостных испытаний. Москва: Металлургия, 1978. – 300 с.
2. Испытательная техника: Справочник. В 2-х кн. // Под ред. Клюева В. В. М.: Машиностроение, 1982. – Кн. 1. – 528 с.
3. Бусько, В. Н. Лабораторная установка для испытаний образцов на усталость бигармоническим нагружением // Приборы и методы измерений. – 2015, № 2. – С. 181–187.
4. Патент РБ на полезную модель № 13540. Устройство для механических испытаний образцов на малоцикловую усталость / В. Н. Бусько. – Оpubл. 2024.08.20.

УДК 331.45

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К РАЗДЕЛУ «ОХРАНА ТРУДА» В ДИПЛОМНЫХ ПРОЕКТАХ СТУДЕНТОВ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОГО ФАКУЛЬТЕТА

Габец В. Л., Автушко Г. Л.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Основными принципами государственной политики Республики Беларусь в области охраны труда являются приоритет жизни и здоровья работников по отношению к результатам производственной деятельности. Анализ несчастных случаев показывает, что основными причинами производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является недостаточный уровень подготовки персонала в области охраны труда, незнание техногенных опасностей и методов защиты от них. В настоящее время изучение предмета «Охрана труда» совершенствуется. С развитием науки появляются новые методы и средства обучения, которые позволяют сделать его более эффективным, интересным и доступным: симуляторы, мобильные приложения, игры, видео и т. д. Эти технологии помогают создавать реалистичные и безопасные условия для практического обучения, а также повышать мотивацию и вовлеченность обучающихся.

Ключевые слова: приоритет жизни и здоровья работников по отношению к результатам производственной деятельности, раздел «Охрана труда» в дипломных проектах, новые методы и средства обучения, компьютерные технологии, психологические аспекты.

IMPROVING OF THE REQUIREMENTS FOR THE CONTENT OF THE SECTION «OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH» IN GRADUATION PROJECTS FOR SPECIALTIES OF THE INSTRUMENTATION ENGINEERING FACULTY

Gobets V., Autushka G.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The main principles of the state policy of the Republic of Belarus in the field of labor protection are the priority of the life and health of workers in relation to the results of production activities. An analysis of accidents shows that the main causes of workplace injuries are the insufficient level of training of personnel in the field of labor protection, ignorance of man-made hazards and methods of protection against them. Currently, the study of the subject “Occupational Safety and Health” is being improved. With the development of science, new methods and means of teaching appear to make it more effective and interesting: simulators, mobile applications, games, videos, etc. These technologies help create realistic and safe hands-on learning environments and increase learner motivation and engagement.

Key words: the priority of the life and health of workers in relation to the results of production activities, section «Occupational Safety and Health» in graduation projects, new methods and means of teaching, computer technologies, psychological aspects.

*Адрес для переписки: Автушко Г. Л., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ohranatruda@bntu.by*

Стремительное развитие приборостроительной отрасли обостряет актуальность проблемы защиты жизни и здоровья людей, занятых в производственном процессе. Интенсивность материальных и информационных потоков в производственной среде постоянно увеличивает круг опасностей, что приводит к немалым социальным и экономическим потерям – повышенной профессиональной заболеваемости, травматизму на производстве, сокращению продолжительности жизни.

В Республике Беларусь вопросам гигиены и безопасности труда уделяется безусловное приоритетное значение. Право работника на безвредный и безопасный труд – важнейшая гарантия, прописанная в основном законе – Конституции Республики Беларусь.

Основными принципами государственной политики в области охраны труда являются приоритет жизни и здоровья работников по отношению к результатам производственной деятельности.

Ратификация Республикой Беларусь 3 мая 1999 г. Конвенции 155 «О безопасности и гигиене труда в производственной среде» Международной организации труда подчеркнула значение совершенствования организации работ, в т.ч. обучения молодых специалистов, охране труда в нашей стране.

Анализ производственных аварий и несчастных случаев показывает, что основными причинами производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является недостаточный уровень подготовки персонала в области охраны труда, незнание техногенных опасностей и методов защиты от них. Поэтому выявление опасных и вредных производственных факторов современного приборостроения, насыщенного сложными техническими средствами, должно являться одной из основных составляющих профессиональной подготовки специалистов высокого уровня.

Для достижения поставленной цели – совершенствования требований к разделу «Охрана

труда» в дипломных проектах – необходимо решить следующие задачи: будущий инженер должен уметь анализировать состояние охраны труда на своем производстве, оценить возможность производственных рисков, разрабатывать мероприятия по созданию здоровых и безопасных, в т. ч. пожаробезопасных, условий труда [1–6].

Методика исследования данной проблемы заключается в проведении анализа мероприятий, способствующих сокращению числа несчастных случаев и профессиональных заболеваний на производстве, повышению безопасности и гигиены труда.

Методология решения проблемы [7, 8] заключается:

- во внедрении психолого-педагогических инноваций в сферу обучения по охране труда;
- в совершенствовании обучения охране труда посредством внедрения в учебный процесс инновационных образовательных технологий.

На завершающем этапе обучения – дипломном проектировании – выпускники ПСФ могут подготовить красочные презентации, в которых наглядно представлены все опасные и вредные производственные факторы, которые могут присутствовать на современном производстве.

Учебная дисциплина «Охрана труда», преподаваемая на Приборостроительном факультете БНТУ, и ее завершающий этап – дипломное проектирование – связаны с такими специальными дисциплинами, как «Охрана окружающей среды», «Эргономика», «Научная организация труда», «Гигиена и физиология труда», «Инженерная психология», «Техническая эстетика». И, конечно же, невозможно изучение предмета «Охрана труда» без знания современных информационных технологий.

Внедрение информационных технологий в учебный процесс дает возможность повышать качество подготовки инженеров, совершенствовать методику их обучения, применять компьютерные инструментальные технологии, ориентированные на ускорение изучения нового материала, адаптацию будущего молодого специалиста к условиям производственной среды предприятий, получать обучающимися устойчивые знания, умения и навыки.

В разделе «Охрана труда» дипломного проекта в качестве индивидуального задания студент ПСФ может произвести расчеты производственных факторов, например, защитное зануление используемого электрооборудования [7, 8]. Эти расчеты удобно совершать в программах Excel – программе для работы с электронными таблицами и Mathcad.

В настоящее время изучение науки «Охрана труда» совершенствуется, безопасности эволюционирует и трансформируется. С развитием науки и технологии появляются новые методы и средства обучения, которые позволяют сделать его более

эффективным, интересным и доступным. Например, все большее применение находят такие технологии, как виртуальная и дополненная реальность, симуляторы, мобильные приложения, игры, видео и т. д. Эти технологии помогают создавать реалистичные и безопасные условия для практического обучения, а также повышать мотивацию и вовлеченность обучающихся.

В разделе «Охрана труда» также необходимо оценивать психологические аспекты при выполнении той или иной технологии – обоснование выбора цветосочетаний производственного интерьера для создания психофизиологического комфорта в помещении; характеристика производства (технологии), габариты помещения, его форма, ориентация по отношению к сторонам света, особенности зрительных работ; количество и состав работающих, контроль психического состояния работников и комплекс мер, положительно влияющих на сокращение несчастных случаев и повышение надежности работ сложных систем [5, 6].

Психология безопасности труда составляет важное звено в структуре мероприятий по обеспечению безопасной деятельности человека. Проблемы травматизма на современном производстве нельзя решать только инженерными методами. Практика показывает, что в основе аварийности от 60 до 90 % случаев лежат не инженерно-конструкторские дефекты, а организационно-психологические причины.

В каждом действии человека психологи выделяют 3 функциональные части: мотивационную, ориентировочную и исполнительную. Человек нарушает правила, инструкции т.к. он не хочет их выполнять, либо он не знает, как это сделать, либо он не в состоянии это сделать.

Нарушение мотивационной части проявляется в нежелании выполнять определенные действия. Нарушение может быть постоянным: человек недооценивает опасность, склонен к риску, отрицательно относится к техническим регламентациям, безопасный труд не стимулируется и временным: человек находится в состоянии депрессии, алкогольного опьянения и т. п.

Нарушение ориентировочной части проявляется в незнании правил эксплуатации технических систем и норм по безопасности труда и способов их выполнения.

Нарушение исполнительной части проявляется в невыполнении правил, инструкций, предписаний и норм вследствие несоответствия психических или физических возможностей человека требованиям работы. Такое несоответствие может быть постоянным: несоответствие роста габаритам обслуживаемого оборудования, плохая концентрация внимания, недостаточная координация и временным: стресс, ухудшение состояния здоровья, переутомление.

В целях предупреждения нарушения правил безопасности необходимо применять меры

организационного и технического характера, включающие возможность появления или создания условий для выполнения опасных действий, лишить работающего возможности делать выбор между опасным и безопасным способом деятельности.

В соответствии с каждой группой причин возникновения опасных ситуаций и несчастных случаев необходимо назначить группу профилактических мероприятий в каждой части: в мотивационной части – пропаганда и воспитание; в исполнительной – профотбор, медицинское обследование; в ориентировочной – обучение, отработка навыков. Таким образом, главная задача обучения охране труда – выявление и преодоление психологических состояний, затрудняющих адекватное реагирование человека на опасные и аварийные ситуации, формирование мотивации и навыков безопасного поведения на рабочем месте.

Специфика обучения охране труда обуславливает важность применения практикоориентированных методов. Изучение дисциплины «Охрана труда» в виртуальной реальности – это опыт, который предоставляет студентам реальные сценарии для подготовки к действиям в чрезвычайных ситуациях. Преимуществом виртуальной реальности перед другими методами является создание безопасной и контролируемой среды, в которой обучающиеся могут изучать и практиковать действия в чрезвычайных ситуациях в реалистичной симуляции. Это особенно важно при отработке мер реагирования на форс-мажорные ситуации высокого риска, когда моделирование в реальной жизни может оказаться невозможным или опасным. Интеграция виртуальной реальности в изучение Охраны труда предполагает использование компьютерных трехмерных изображений и звуков для моделирования сложных сценариев. Технология виртуальной реальности может позволить проводить интерактивные и увлека-

тельные занятия, которые являются наиболее запоминающимися, чем традиционное обучение в классе или по учебникам.

Литература

1. Правила безопасности организации образовательного процесса, организации воспитательного процесса при реализации образовательных программ профессионально-технического, среднего специального и высшего образования, утв. постановлением Министерства образования Республики Беларусь от 03.08.2022 № 227.

2. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 22.02.2008 №53 «Об аттестации рабочих мест по условиям труда» с изм. постановления Совета Министров Республики Беларусь от 03.03.2021 №125.

3. Инструкция по оценке условий труда при аттестации рабочих мест по условиям труда и представлению компенсаций по ее результатам, утв. Постановлением Министерства труда и социальной защиты Республики Беларусь от 22.02.2008 № 35 с изм. от 10.01.2020.

4. Санитарные нормы и правила «Гигиеническая классификация условий труда», утв. Постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 28.12.2012 «211 с изм. от 02.07. 2015 № 89.

5. Инструкция № 027-1212 «Гигиеническая оценка характера трудовой деятельности по показателям тяжести и напряженности», утв. Министерством здравоохранения Республики Беларусь от 13.06.2013.

6. СНиП «Требования к условиям труда работающих и содержанию производственных объектов» утв. Министерством здравоохранения от 08.07.2016. № 85.

7. Данилко Б. М. Охрана труда. Методические указания и контрольные задания для студентов заочной формы обучения инженерно-педагогического факультета специальности 1-08 01 01 «Профессиональное обучение (по направлениям)» / Б. М. Данилко, Т. Н. Киселева, Г. Л. Автушко. – Минск: БНТУ, 2011. – 52 с.

8. Лазаренко А. М. Методические указания по выполнению раздела «Охрана труда» дипломных проектов для студентов приборостроительного факультета / А. М. Лазаренков, А. М. Науменко, Г. Л. Автушко. – Минск: БНТУ, 2010.

УДК 621.791

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ СМК ДЛЯ ПРОЕКТНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Гуринович А. А.¹, Серенков П. С.², Давыдова Е. А.²

¹ЗАО «Струнные технологии»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Приведен анализ существующих организационных структур как составляющих системы коммуникаций в рамках СМК. В процессе перехода промышленности к проектной форме организации работ, предлагается вводить в организационные структуры дополнительное звено, отвечающее за оперативную координацию как процессами, так и ресурсами. Рассмотрены варианты организации такого рода звена. Определены основные задачи: оптимизация существующих бизнес-процессов и разработка новых с целью экономии ресурсов и повышения результативности деятельности организации.

Ключевые слова: система коммуникаций в рамках СМК, проектно ориентированная организация, организационная структура.

FEATURES OF THE QMS ORGANIZATIONAL STRUCTURE FOR PROJECT-ORIENTED ORGANIZATIONS

Hurynovich A.¹, Serenkov P.², Davidova E.²

¹Unitsky String Technology Inc.

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article presents an analysis of existing organizational structures as components of the communications system within the QMS. In the process of industry's transition to a project-based form of work organization, it is proposed to introduce an additional link into organizational structures responsible for operational coordination of both processes and resources. Options for organizing such a link are considered. The main tasks are defined: optimization of existing business processes and development of new ones in order to save resources and improve the organization's performance.

Key words: communication system within the QMS, project-oriented organization, organizational structure.

Адрес для переписки: Серенков П. С., ул. Я. Коласа, 22, 518, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: pavelserenkov@bntu.by

Сегодняшняя тенденция потребительских предпочтений индивидуализации продукции и услуг предопределила наступление промышленной революции «Индустрия 4.0», ее следствием является переход к единичному производству, основанному на понятии проекта как уникального процесса в соответствии с определением СТБ ISO 9000. Характерными классами организационных структур, результативных с позиций рациональности организационной структуры в условиях проектной организации деятельности организации [1, 2], являются целевые и смешанные.

Анализ возможных вариантов организации производства в условиях проектной деятельности организации позволил выявить ряд особенностей, которые существенно снижают результативность традиционных коммуникаций (процессных и иерархических), привязанных к типичной целевой или смешанной организационным структурам, в достижении целей бизнес-процессов. На примере деятельности проектной организации строительного профиля определены источники дестабилизации основного процесса – проектирования. Это прежде всего – нечеткое формулирование требований и неизбежное уточнение их заказчиком в процессе проектирования и сдачи

проекта, а следовательно, неизбежная доработка проекта после первичной приемки заказчиком. Источники дестабилизации приводят к следующим последствиям, касающимся коммуникаций: авральному перемещению ресурсов (специалистов) между параллельными процессами; простоям или перегрузке оборудования, задействованного для выполнения процессов. Основные негативные результаты дестабилизации – временные потери (задержки выпуска), нерациональное использование ресурсов (недостаточная загрузка или перезагрузка персонала и оборудования), что сказывается на результативности и эффективности СМК организации и результатах деятельности в целом.

В таких условиях наиболее оптимальным будет решение реорганизовать сложившуюся систему коммуникаций инженерного направления. Корректировка предполагает введение в сложившуюся систему процессных и иерархических коммуникаций дополнительного звена – структуру, реализующую горизонтальную связь между параллельными проектами (процессами) [2, 3]. Назначение такой структуры – координация работы проектов (процессов) в случае сбоя запланированного производственного ритма (повторной доработки проекта). Важным

моментом в такой корректировке организационной структуры является ее «независимость» от основных структурных подразделений, с целью обеспечения объективности ее точки зрения и отсутствия влияния со стороны других структурных подразделений (рисунок 1).

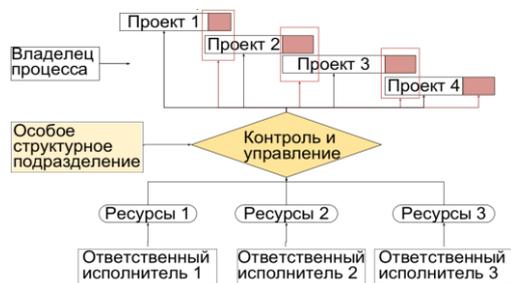


Рисунок 1 – Вариант корректировки организационной структуры

На сегодняшний день чаще высказывается мысль о том, что проектный менеджмент (в аспекте использования функций горизонтальных связей между структурными подразделениями, сформированными в виде классических вертикальных «колодцев» управления) используют для искоренения бюрократии (в ее современном понимании) и формирования большей оперативности и гибкости в осуществлении деятельности организаций, особенно в условиях индивидуализации производства [2, 3].

В проектной деятельности проблема оптимального использования ресурсов остается открыта. Более того, индивидуализация производства ведет за собой нехватку квалифицированных кадров, что уже сегодня четко озвучивается, в частности, в технической сфере. А, следовательно, обостряется необходимость поисков новых подходов решения вопросов оптимизации бизнес-процессов и повышения эффективности и результативности деятельности организаций.

В зависимости от размера и возможностей организации и количества проектов, функции горизонтальной связи или горизонтальных коммуникаторов может выполнять как один сотрудник, так и целая команда. Рассмотрен пример организации Scania Sverige AB (шведский производитель грузовых автомобилей, автобусов, промышленных и морских двигателей, осуществляющий полный цикл производства). В основе деятельности этой организации лежит методология СМК, которая также постепенно дополняется другими методологиями или их частями (отдельными принципами) для достижения результатов в своей деятельности в зависимости от целей или внешних факторов, которые пересматриваются с заданной периодичностью. В частности, активно используется процессный подход, методологии Шесть Сигм, Kanban, Scrum и Agile. Также в организационно - технической части (разработках, производстве, логистике) широко используются

функции горизонтальных коммуникаторов, сохраняя классическую функциональную организационную структуру (в виде вертикальных «колодцев» управления), которая может трансформироваться в процессе появления новых проектов. Например, когда руководством организации принимается решение о создании новой коробки передач или совершенствования существующей, как «горизонтальный» временный проект, не влияющий на основное производство, то назначается лицо, ответственное за этот проект (менеджер проекта или координатор). Руководители функциональных подразделений информируются об этом и совместно с координатором формируют кросс-функциональную команду для работы над проектом. Координатор проекта выступает как временный руководитель группы и проекта, а участники группы попадают в двойное подчинение на время работы над проектом (оставаясь в подчинении руководителя своего структурного подразделения).

Кроме того, если в какой-то деятельности необходимость выполнения таких параллельных проектов присутствует постоянно, то функциональная организационная структура может сформировать постоянную группу таких координаторов по одному или нескольким направлениям или профилям, например: по процессам тестирования, по описанию бизнес-процессов, по вопросам складской логистики. Эти сотрудники ведут учет плановых действий и показателей, выступают «контактным лицом» по вопросам данного конкретного узкого направления, информируют всех заинтересованных сторон по рабочим вопросам или ходу выполнения работ, взаимодействуют с вышестоящим руководством по вопросам отчетности или в форс-мажорных обстоятельствах и, что не маловажно, налаживают необходимые коммуникации в кросс-функциональных группах. Деятельность таких сотрудников решает очень много проблем во взаимодействиях сотрудников структурных подразделений, как в коммуникациях, так и в операционной деятельности что ведет к очень значительной экономии времени, денежных ресурсов и также способствует «здоровой» психологической атмосфере на рабочем месте, что, в свою очередь, как замкнутый круг снова повышает результативность итоговой деятельности организации.

Литература

1. Серенков, П. С. Формирование рациональной организационной структуры с помощью комплексного процессного подхода / П. С. Серенков, В. В. Назаренко, О. И. Ромбальская // Методы менеджмента качества. – 2015. – № 7. – С. 24–32.
2. Серенков, П. С. Коллизии процессного подхода / П. С. Серенков, В. В. Назаренко, О. И. Ромбальская // Методы менеджмента качества. – 2015. – № 5. – С. 18–24.
3. Vaskevich, D. Client Server Strategies: A Survival Guide for Corporate Reengineers. 2nd Edition / D. Vaskevich. – John Wiley & Sons Inc, 1995. – 500 p.

УДК 621.791

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ КОММУНИКАЦИЙ В РАМКАХ СМК НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИИ ПОНЯТИЙ

Гуринович А. А.¹, Серенков П. С.², Давыдова Е. А.²

¹ЗАО «Струнные технологии»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. По результатам анализа стандартов СТБ ISO серии 9000 установлено, что коммуникации – один из ключевых аспектов результативности системы менеджмента качества (СМК). Обоснована актуальность научно-методической разработки основ формирования системы коммуникаций как элемента СМК организации. В основу разработки положена онтологическая модель понятия «коммуникация» на основе анализа ассоциативно близких терминов, которая позволила обосновать корректную структуру системы коммуникаций как совокупность организационно-технической и гуманистической составляющих. **Ключевые слова:** система коммуникаций в рамках СМК, онтология понятий, организационно-техническая составляющая, гуманистическая составляющая.

MODEL OF COMMUNICATION SYSTEM WITHIN THE FRAMEWORK OF QMS BASED ON THE ONTOLOGY OF CONCEPTS

Hurynovich. A.¹, Serenkov P.², Davidova E.²

¹Unitsky String Technology Inc.

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Based on the results of the analysis of STB ISO 9000 series standards, it was established that communications are one of the key aspects of the effectiveness of the quality management system (QMS). The relevance of scientific and methodological development of the foundations for the formation of a communications system as an element of the organization's QMS is substantiated. The development is based on an ontological model of the concept of "communication" based on the analysis of associatively close terms, which made it possible to substantiate the correct structure of the communications system as a set of engineering and humanistic components.

Key words: communication system within the QMS, ontology of concepts, engineering component, humanistic component.

Адрес для переписки: Серенков П. С., ул. Я. Коласа, 22, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: pavelserenkov@bntu.by

По результатам анализа стандартов ISO серии 9000 в отношении требований к коммуникациям, установлено:

1. Система коммуникаций в организации в рамках СМК является одним из ключевых элементов результативности системы менеджмента качества, в особенности для проектно-ориентированных организаций, что наиболее актуально в условиях наступления промышленная революция «Индустрия – 4.0»;

2. Коммуникации являются комплексным понятием, их можно представить как систему, которая, включает две очевидные составляющие: организационно-техническую и гуманистическую;

3. Формирование (развертывание) системы коммуникаций в организации требует комплексного подхода, что подразумевает параллельное и взаимосвязанное формирование обеих составляющих коммуникаций в организации (организационно-техническую и гуманистическую);

4. На сегодня отсутствует научно-методическое обоснование реализации и развертывания этих составляющих системы коммуникаций (то есть потребность рынка есть, а методы отсутствуют).

Идентифицированы следующие элементы системы коммуникаций в рамках СМК организа-

ции: организационная структура, информационные потоки, бизнес-коммуникации, корпоративная культура и мотивация (то, что называется гуманистические аспекты коммуникаций). Однако все эти элементы методологически не взаимосвязаны друг с другом и существуют «сами по себе»:

– эксперты в области гуманистических наук (психологи, социологи) определяют одни правила;

– специалисты формирующие бизнес-структуры – второе;

– специалисты формирующие организационные структуры – третье;

– существуют требования ISO, где организация в лице высшего руководства должна создать/разработать систему коммуникаций, при отсутствии четких инструкций;

– промышленная революция «Индустрия-4.0» накладывает дополнительные требования.

Таким образом, система коммуникаций должна быть: адаптивная, с короткими связями, учитывать вопросы мотивации и других психологических и социальных аспектов. На основании чего мы можем сделать вывод о необходимости научно-методической проработки основ формирования системы коммуникаций в рамках СМК как элемента СМК, с учетом системного подхода.

Попытка разработки такой системы ассоциируется с тремя основными элементами:

1. Определить классификационное основание и классификацию коммуникаций в рамках СМК;
2. Разработать методологию формирования инженерной составляющей коммуникаций в рамках СМК;
3. Разработать методологию формирования гуманитарной составляющей коммуникаций в рамках СМК.

Анализ терминов и основных понятий, которые приведены в литературных источниках и стандартах ISO серии 9000 представлен в виде онтологии по подобию с приложением А СТБ ISO 9000. Онтологическая модель понятия «коммуникация» представлен на рисунке 1, из которого следует, что классификация понятия базируется не на партитивных, а на родовидовых связях.

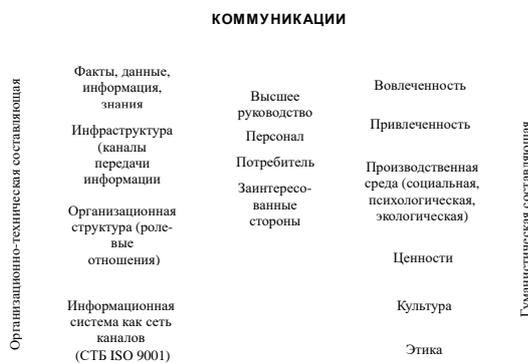


Рисунок 1 – Онтология понятия «коммуникации»

Понятие «коммуникации», прежде всего, ассоциируется с персоналом организации в лице сотрудников и высшего руководства. С одной стороны располагаются элементы технического направления, в совокупности составляющие информационную систему как сеть каналов коммуникации, согласно СТБ ISO 9000-2015:

- факты, данные, информация и знания;
- инфраструктура в виде каналов передачи информации;
- организационная структура (ролевые отношения).

С другой стороны располагаются элементы и понятия, относящиеся к нетехническим аспектам: вовлеченность персонала, привлеченность персонала, производственная среда (социальные, психологические и экологические аспекты), ценности организации, культура организации, этические аспекты.

Из рисунка 1 очевидно вытекает две составляющие коммуникаций: организационно-техническая и гуманитарная.

Организационно-техническая составляющая системы коммуникаций состоит из двух ключевых аспектов: организационной структуры и информационных потоков, которые циркулируют в рамках информационной структуры (рисунок 2).

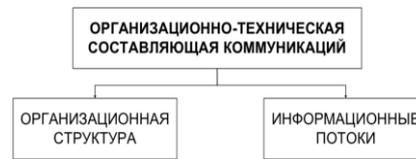


Рисунок 2 – Аспекты организационно-технической составляющей коммуникаций

Таким образом организационная структура выступает в роли «скелета» (кто с кем коммуницирует, в соответствии с иерархией подчиненности), а информационные потоки – это то, в каком виде информация циркулирует туда и обратно [1].

Гуманистическая составляющая коммуникаций тесно связана с понятиями «корпоративная культура», мотивация и вовлеченность. В докладе показано, что гуманитарная составляющая имеет не меньшую значимость, чем организационно-техническая. На рисунке 3 приведены аспекты гуманитарной составляющей коммуникаций.



Рисунок 3 – Гуманистическая составляющая коммуникаций

Как видно из рисунка 3, помимо аспекта, представляющего корпоративную среду, культуру, правила и нормы (например, эксперты аудиторы в своей работе руководствуются четким сводом правил, прописанных в СТБ ISO 19011-2021), весомую позицию занимает аспект межличностных (неформальных) коммуникаций, которые при любых условиях присутствует в рабочих отношениях [2]. Последние можно далее развернуть на: деловые, эмоционально-окрашенные; неделовые. Причем, все три разновидности могут присутствовать в совершенно различных комбинациях.

Вывод. При формировании системы коммуникаций в рамках СМК организации в обязательном порядке следует разрабатывать обе составляющие: организационно-техническую и гуманитарную. Только в этом случае можно достичь заданного уровня результативности системы.

Литература

1. Сайфутдинова, Г. М. Особенности проектирования открытой организационной структуры предприятия // Г. М. Сайфутдинова / Студенческий научный журнал «Грани науки». – 2015. – Т. 3, № 2. – С. 39–42.
2. Бергис, Т. А. Психология управления: учебное пособие // Т. А. Бергис. – Тольятти: ТГУ, 2021. – 288 с.

УДК 629.4.051.2

ПРОБЛЕМЫ ИНТЕГРАЦИИ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА ПРЕДПРИЯТИЙ

Давыдова Е. А., Чуешков В. В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Внедрение системного подхода позволит обеспечить качество продукции. За последние годы в нашей стране пересмотрены наиболее часто применяемые стандарты, устанавливающие требования к системам менеджмента, гармонизированные с международными: СТБ ISO 9001–2015, СТБ ISO 22000–2020, СТБ ISO 14001–2017, СТБ ISO 45001–2020, ГОСТ ISO 50001–2021 и ряд других. Данные стандарты построены по одной структуре, что облегчает для организации разработку и внедрение нескольких систем менеджмента в качестве интегрированной системы. Внедрение и сертификация интегрированных систем менеджмента позволит организации получить ряд выгод.

Ключевые слова: качество, интеграция систем менеджмента, международные стандарты, сертификация.

PROBLEMS OF INTEGRATION OF ENTERPRISE MANAGEMENT SYSTEMS

Davidova E., Chueshkov V.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Annotation. The introduction of a systematic approach will ensure product quality. In recent years, our country has revised the most commonly used standards that establish requirements for management systems, harmonized with international ones: STB ISO 9001–2015, STB ISO 22000–2020, STB ISO 14001–2017, STB ISO 45001–2020, GOST ISO 50001–2021 and a number of others. These standards follow a single structure, which makes it easier for an organization to develop and implement multiple management systems as an integrated system. The implementation and certification of integrated management systems will allow the organization to receive a number of benefits.

Key words: quality, integration of management systems, international standards, certification.

*Адрес для переписки: Давыдова Е. А., ул. Я. Коласа, 22, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: davydovaea@bntu.by*

В настоящее время приоритетной задачей является обеспечение качества и безопасности продукции, повышение конкурентоспособности и экспортного потенциала отечественных производственных предприятий. Необходимым условием для реализации этой задачи является способность предприятия производить качественную и безопасную продукцию, оказывать на высоком уровне услуги и производить работы.

На сегодняшний день внедрение системного подхода позволит обеспечить качество продукции. Система менеджмента качества, отвечающая требованиям международного стандарта ISO 9001, представляет собой эффективный инструмент, с помощью которого возможно оптимально реагировать и осуществлять постоянное улучшение качества продукции. Внедрение и применение процессного подхода позволяет улучшить результативность СМК и рост удовлетворенности потребителя посредством выполнения его требований. Таким образом, предприятия, применившие систему, могут дать гарантию качества выпускаемой продукции.

Одним из критериев оценки такой способности является наличие внедренной систем менеджмента в соответствии с требованиями международных стандартов. ISO серии 9000 (Система менеджмента качества), ISO серии 14000 (Система

менеджмента окружающей среды) и OHSAS серии 18000 (Система менеджмента профессиональной безопасности и охраны труда), ISO серии 22000 (Система менеджмента безопасности пищевой продукции.).

В последней редакции международного стандарта ISO 9001:2015 не предусмотрено каких-либо документированных процедур, что дает больше свободы предприятиям больше свободы, поскольку позволяет им лучше адаптировать систему менеджмента качества к своей специфике. Более того, обеспечивается большая гибкость в процессе сертификации, поскольку общие правила для всех не должны применяться.

Также следует отметить, что ISO 9001:2015 соответствует Структуре высокого уровня (High Level Structure, HLS) для систем менеджмента. Поэтому организациям, использующим более одной системы менеджмента (например, ISO 14000, ISO 45000, ISO 22000 и т. д.) легче их интегрировать в единую систему.

Гармонизированная структура (HS) или структура высокого уровня (HSL) это руководство по разработке новых стандартов систем ISO, которое в значительной степени гармонизирует их структуру и требования. Целью ISO является обеспечение единообразного использования основных текстов, терминов и определений. Это является

очень полезным для тех организаций, которые предпочитают использовать единую интегрированную систему менеджмента, которая может отвечать требованиям двух или более систем менеджмента одновременно.

За последние годы в нашей стране пересмотрены наиболее часто применяемые стандарты, устанавливающие требования к системам менеджмента, гармонизированные с международными:

– СТБ ISO 9001–2015 Система менеджмента качества. Требования;

– СТБ ISO 22000–2020 Системы менеджмента безопасности пищевой продукции. Требования к организациям, участвующим в пищевой цепи.

– СТБ ISO 14001–2017 Системы менеджмента окружающей среды. Требования и руководство по применению;

– СТБ ISO 45001–2020 Системы менеджмента здоровья и безопасности при профессиональной деятельности. Требования и руководство по применению;

– ГОСТ ISO 50001–2021 Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению.

Данные стандарты построены по одной структуре, что облегчает для организации разработку и внедрение нескольких систем менеджмента в качестве интегрированной системы.

Кроме того, пересмотрен стандарт СТБ ISO 19011–2011, содержащий руководящие указания по аудиту систем менеджмента. Данный стандарт применим ко всем организациям, которым необходимо планировать и проводить внутренние или внешние аудиты систем менеджмента, которым необходимо планировать и проводить внутренние или внешние аудиты систем менеджмента или осуществлять менеджмент программы аудита. Данный стандарт также предусматривает проведение комбинированного аудита, то есть аудита сразу нескольких систем менеджмента в организации.

Внедрение и сертификация интегрированных систем менеджмента позволит организации:

– снизить затраты на разработку, внедрение и функционирование интегрированных систем менеджмента по сравнению с несколькими самостоятельно внедряемыми системами менеджмента;

– снизить количество документов организации за счет исключения дублирования процессов по

различным системам менеджмента (например, требования к проведению внутренних аудитов, анализу со стороны производства и др.);

– повысить согласованность действий внутри организаций, свести к минимуму функциональную разобщенность в организации, часто возникающий при разобщенной разработке отдельных систем менеджмента;

– создать условия для снижения разночтений и конфликтов между различными системами менеджмента за счет разработки единой политики организации, целей и задач в области качества;

– содействовать постоянному совершенствованию систем менеджмента организации;

– обеспечить условия для создания единой корпоративной культуры;

– повысить имидж организации;

– снизить затраты на сертификацию за счет проведения комбинированного аудита третьей стороной.

Опыт нескольких десятилетий показал неоспоримые преимущества внедряемых систем качества.

Боле того, в настоящее время актуальными задачами, стоящими перед отечественными предприятиями, является внедрение концепций «Бережливое производство» и «Шесть сигм».

По мнению авторов, внедрение данных концепций также целесообразно в рамках интегрированной системы менеджмента, поскольку положения, например, концепции «Бережливое производство» целесообразно тесно интегрировать с отдельными положениями СТБ ISO 9001-2015, СТБ ISO 45001-2020 и возможно СТБ ISO 22000-2020 для производителей пищевой продукции.

В Республике Беларусь интегрированные системы менеджмента при всех имеющихся преимуществах создаются с некоторым отставанием. Причиной тому является то, что на сегодняшний день нет единой общепризнанной модели, не разработано единого подхода к интеграции систем менеджмента, не разработан стандарт Международной организацией по стандартизации по интеграции систем менеджмента [1].

Литература

1. Царик В. Д. Модели интегрированных систем менеджмента / Финансовые рынки и банки. – 2022. – № 5. – С. 56–60.

**МЕТОДИКА АТТЕСТАЦИИ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА
УРОВНЯ СМЯГЧЕНИЯ УДАРА
Дубейко С. В., Коробко Ю. С.**

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрена методика аттестации испытательного оборудования, позволяющего определить уровень смягчения удара (критической высоты падения) искусственного ударопоглощающего покрытия на детских игровых и спортивных площадках.

Ключевые слова: критическая высота падения, методика аттестации, детские площадки, ударопоглощающие покрытия, испытательное оборудование

**THE METHODOLOGY OF ATTESTATION OF THE TEST BENCH
OF THE IMPACT MITIGATION LEVEL**

Dubeyko S., Korobko Yu.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The method of certification of test equipment allowing to determine the level of impact mitigation (critical drop height) of artificial shock-absorbing coating on children's playgrounds and sports grounds is considered.

Key words: critical drop height, certification methodology, playgrounds, shock-absorbing coatings, testing equipment.

*Адрес для переписки: Коробко Ю. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: korobko.u@bntu.by*

Для обеспечения безопасности игровых площадок и сооружений, их напольные и наземные покрытия должны быть травмобезопасными, например, при падениях. Требования к обеспечению травмобезопасности покрытий приобретают еще большую актуальность, когда они используются на игровых детских площадках (в детских садах, школах, во дворах и местах развлечений и т. п.).

Сегодня многочисленные производители спортивного оборудования предлагают огромный выбор как наземных, так и напольных покрытий для спортивных и игровых площадок: растительного и природного происхождения, резиновые, на основе полимеров и др. Порой они имеют сомнительное происхождение и качество. Это требует решение актуальной задачи – их испытание на соответствие требованиям безопасности их применения.

В работе предлагается оригинальная методика аттестации испытательного оборудования (стенда), позволяющего определить уровень смягчения удара (критической высоты падения) искусственного ударопоглощающего покрытия на детских игровых и спортивных площадках. Испытательный стенд предназначен для оценки способности покрытий игровых и спортивных площадок смягчать удар при падении согласно требований ТНПА [1–3].

Вкратце рассмотрим методику аттестации в части контролируемых показателей.

Показатель: «Определение диаметра испытательного модуля». Требования, предъявляемые к параметру – диаметр (160 ± 5) мм. Следовательно,

погрешность метода не должна превышать $1/3$ от 5 мм.

При рассмотрении этой характеристики был предложен метод, при котором испытательный модуль располагают на поверочной плите, высоту измеряют с помощью линейки (четырекратно) и радиус определяют расчетным путем с помощью измерения длины окружности рулеткой (трехкратно) – на выходе у нас значение радиуса и высоты полусферы испытательного модуля. Далее на основе математических зависимостей производим расчет диаметра сферы используя полученные ранее значения радиуса и высоты.

Данный метод имеет погрешность $\Delta_{мет}$:

$$\Delta_{мет} = \sqrt{\Delta_{o1}^2 + \Delta_{o2}^2 + \Delta_{си1}^2 + \Delta_{си2}^2 + \Delta_{отк. от плоск.}^2}$$

где Δ_{o1} – погрешность оператора при измерении высоты испытательного модуля линейкой; Δ_{o2} – погрешность оператора при измерении длины окружности диаметра испытательного модуля рулеткой; $\Delta_{си1}$ – погрешность средства измерения (рулетка); $\Delta_{си2}$ – погрешность средства измерения (линейка); $\Delta_{отк. от плоск.}$ – погрешность, вызванная отклонением от плоскостности поверочной плиты.

Рассчитаем погрешность оператора.

При измерении высоты испытательного модуля линейкой:

$$\Delta_{o1} = 0,1 \cdot ЦД1 = 0,1 \cdot 1 = 0,1 \text{ мм,}$$

где ЦД1 – цена деления средства измерения (линейки).

При измерении длины окружности диаметра испытательного модуля рулеткой:

$$\Delta_{o2} = 0,1 \cdot ЦД2 = 0,1 \cdot 1 = 0,1 \text{ мм},$$

где ЦД2 – цена деления средства измерения (рулетки).

Погрешности: $\Delta_{СИ1}$, $\Delta_{СИ2}$, $\Delta_{отк от плоск}$ – даны в сопроводительной документации на средства измерения.

Рассчитаем погрешность метода:

$$\begin{aligned} \Delta_{мет} &= \sqrt{\Delta_{o1}^2 + \Delta_{o2}^2 + \Delta_{СИ1}^2 + \Delta_{СИ2}^2 + \Delta_{отк от плоск}^2} = \\ &= \sqrt{0,1^2 + 0,1^2 + 0,1^2 + 0,5^2 + 0,012^2} = 0,5 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Рассчитанная погрешность метода не превышает допустимого значения:

$$\Delta_{доп} = 1,67 \text{ мм} > \Delta_{мет} = 0,5 \text{ мм}.$$

Показатель: «Определение массы испытательного модуля». Требования, предъявляемые к параметру – масса ($4,6 \pm 0,05$) кг. Следовательно, погрешность метода не должна превышать 1/3 от 0,1 кг.

При рассмотрении этой характеристики был предложен метод, при котором массу испытательного модуля определяют путем прямого измерения на весах.

Данный метод имеет погрешность $\Delta_{мет}$:

$$\Delta_{мет} = \Delta_{СИ},$$

где $\Delta_{СИ}$ – погрешность средства измерения (весы).

Рассчитаем погрешность метода:

$$\Delta_{мет} = \Delta_{СИ} = 6 = 6 \text{ г}.$$

Рассчитанная погрешность метода не превышает допустимого значения:

$$\Delta_{доп} = 0,0167 \text{ кг} > \Delta_{мет} = 0,006 \text{ кг}.$$

Показатель: «Определение отклонения от сферичности испытательного модуля». Требования, предъявляемые к параметру – отклонение от сферичности не более 0,5 мм. Следовательно, погрешность метода не должна превышать 1/3 от 0,5 мм.

При рассмотрении этой характеристики был предложен метод, при котором отклонения от сферичности модели головы проводят с помощью трехкоординатной измерительной машины

Измерение проводят в трех экваториальных плоскостях, расположенных под углом 90° одна к другой.

За результат единичного измерения принимают зафиксированное отклонение от круглости в одной из плоскости.

За результирующее значение отклонения от сферичности принимают наибольшее из полученных значений, измеренных в трех плоскостях.

Данный метод имеет погрешность $\Delta_{мет}$:

$$\Delta_{мет} = \Delta_{СИ},$$

где $\Delta_{СИ}$ – погрешность средства измерения (координатно-измерительная мобильная машина).

Рассчитаем погрешность метода:

$$\Delta_{мет} = \Delta_{СИ} = 0,012 = 0,012 \text{ мм}.$$

Рассчитанная погрешность метода не превышает допустимого значения: $\Delta_{доп} = 0,167 \text{ мм} > \Delta_{мет} = 0,012 \text{ мм}$.

Методика аттестации разработана в соответствии с требованиями СТБ 8015 и содержит основные разделы, включающие введение, нормативные ссылки, условия аттестации, требования безопасности, операции и средства аттестации, подготовка к аттестации, проверка комплектности, порядок проведения аттестации, правила обработки результатов измерения и правила оформления результатов аттестации [4].

Литература

1. ТР ТС 042/2017. О безопасности оборудования для детских игровых площадок.
2. ГОСТ 34615–2019 (EN 1177:2018+AC: 2019). Покрытия ударопоглощающие игровых площадок. Определение критической высоты падения.
3. ГОСТ Р EN 1177–2013. Покрытия игровых площадок ударопоглощающие. Определение критической высоты падения.
4. СТБ 8015–2016. Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Испытательное оборудование. Общие требования к аттестации.

УДК 621.31/36

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ВЫСОТЫ ПАДЕНИЯ: УЧЕТ ВОЗРАСТНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕТЕЙ

Дубейко С. В., Коробко Ю. С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрен вопрос о пригодности получаемых результатов испытания по определению критической высоты падения для детей различных возрастных категорий. Выявлен недостаток испытательного оборудования, предложены пути решения.

Ключевые слова: критическая высота падения, критерий повреждения головы, акселерометр, модель головы, детские площадки, масса.

DEFINITION CRITICAL FALL HEIGHT: ACCOUNTING AGE CHARACTERISTICS OF CHILDREN

Dubeyko S., Korobko Yu.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The question of the suitability of the test results obtained to determine the critical height of the fall for children of different age categories is considered. A shortage of test equipment has been identified, and solutions have been proposed.

Key words: critical fall height, head injury criterion, accelerometer, head model, children's playgrounds, mass.

Адрес для переписки: Коробко Ю. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: korobko.u@bntu.by

В жизни детей игровые площадки играют не маловажную роль, так как дети проводят на них значительное количество времени. Ребенок при посещении игровых площадок получает двойную пользу: развивается физически и приобретает социальные навыки.

Для безопасного времяпровождения ребенка на площадках должны быть соблюдены определенные требования. Такие как обеспечение безопасности самой площадки (оборудования и покрытия), которое реализуется через соблюдения нормативной базы Республики Беларусь. На данный момент главным документом который регулирует обеспечение безопасности оборудования для детских игровых площадок является технические регламенты ЕАЭС (ТС).

Из приведенных требований технического регламента ЕАЭС (ТС) можно выделить требования к покрытиям игровых площадок, так как они являются константой для всех видов площадок, а применяемое оборудование может претерпевать изменения [1].

Требования к покрытиям можно условно разделить на 2 группы: требования к материалам из которых производится покрытие (гигиенические, химические, показатели, относящиеся к пожарной безопасности и др.) и требования к конечному продукту (физико-механические показатели).

Рассмотрим основные требования, предъявляемые к показателям конечного продукта. Покрытие не должно иметь опасные острые или выступающие части, а его конструкция должна исключать места защемления. В зависимости от вида покрытия варьируется его толщина. Под всем оборудованием с высотой свободного падения более 600 мм и /или под

оборудованием с принудительным движением пользователя (например, качели, горки, спуски, канатные дорожки, карусели и т. д.) должно быть предусмотрено ударопоглощающее покрытие по всей зоне приземления. И одно из основополагающих требований, которое должно соблюдаться – критическая высота падения, применяемого ударопоглощающего покрытия должна быть не менее высоты свободного падения оборудования. Несоблюдение этого требования может привести к серьезным травмам ребенка [2].

Определение критической высоты падения осуществляется по ГОСТ 34615-2019. Сам метод основан на определении поглощения удара покрытием путем измерения ускорения при ударе. Испытуемое покрытие подвергают ударам моделью головы (сбрасывание осуществляется безынерционно без первоначального ускорения) с закрепленным на ней измерительным оборудованием (акселерометр) с различных высот падения. Сигналы, подаваемые акселерометром(ами) от модели головы во время каждого удара обрабатывают для определения степени тяжести повреждения на основании измеренной энергии удара, установленной в качестве критерия повреждения головы HIC , а также измерения возникающего пикового ускорения g_{max} . От полученных результатов устанавливается критическая высота падения: высота падения, соответствующая значению $HIC = 1000$ и значению $g_{max} = 200g$ [3].

Проводя испытание по определению критической высоты падения мы моделируем ситуацию падения ребенка с игрового оборудования с последующим его приземлением на голову, представляя голову ребенка как полусферу

(модель головы), которая осуществляет падение на землю (неупругий удар).

Оборудование, используемое при испытаниях, имеет несколько составных частей: модель головы, оснащенную одним или несколькими акселерометрами, блок преобразования сигналов, пусковое устройство модели головы, устройство для высоты свободного падения, систему передачи сигналов и оборудование для измерения сигналов. Основным элементом с помощью которого производится измерение – модель головы.

Модель головы имеет определенные установленные параметры: должна иметь диаметр (160 ± 5) мм и массу ($4,6 \pm 0,05$) кг, с максимально допустимым отклонением от полусферической поверхности ударной части – 0,5 мм. Рассматривая параметры модели головы возникает вопрос в достоверности получаемой информации применительно к безопасности эксплуатации детских площадок для детей различных возрастных категорий. Ведь согласно международному стандарту физиологических показателей детей размер окружности головы у детей различается в зависимости от возраста и пола (таблицы 1 и 2) [4]. Следовательно, и масса головы у детей различается. И теперь результаты, получаемые при испытаниях на определения критической высоты падения, распространяются только на группу детей, имеющих массу головы ($4,6 \pm 0,05$) кг. А для остальной группы детей результаты будут иметь погрешность, которая будет увеличиваться/уменьшаться по мере отхождения/приближения массы головы ребенка к номинальному значению модели головы ($4,6 \pm 0,05$) кг.

Для решения данной проблемы предлагается несколько путей решения, основанные на разработке или внесении модификаций в применяемом оборудовании при определении критической высоты падения. Пути решения связаны с ограничением возрастной группы детей допускаемой до определенных игровых площадок, путем использования нескольких моделей головы имеющих различную массу в зависимости от возраста ребенка или путем разработки съёмных накладок для модели головы, которые бы при использовании в сборе с моделью головы воспроизводили определенную величину массы. Каждый из предложенных вариантов имеет свои положительные и отрицательные стороны. Первый вариант сопряжен с большими непрерывными затратами на производство данного комплекса оборудования, но достаточно легкий в исполнении. Легкость заключается в наличие уже готового исходного

шаблона, который будет нуждаться только в изменении его массы. Второй же вариант понесет лишь единовременные большие затраты на этапе разработки, но в дальнейшем при производстве готового продукта стоимость будет меньше.

Таблица 1 – Центильная таблица окружности головы (см) по возрасту (мальчики)

Возраст: месяц	ЦЕНТИЛИ				
	3	15	50	85	97
0:0	32,1	33,1	34,5	35,8	36,9
0:11	43,4	44,4	45,8	47,1	48,2
1:0	43,6	44,7	46,1	47,4	48,5
1:11	45,6	46,7	48,1	49,5	50,7
2:0	45,7	46,8	48,3	49,7	50,8
2:11	46,7	47,9	49,4	50,8	52,0
3:0	46,8	48,0	49,5	50,9	52,1
3:11	47,4	48,6	50,2	51,7	52,9
4:0	47,5	48,7	50,2	51,7	53,0
4:11	47,9	49,2	50,7	52,3	53,5
5:0	47,9	49,2	50,7	52,3	53,5

Таблица 2 – Центильная таблица окружности головы (см) по возрасту (девочки)

Возраст: месяц	ЦЕНТИЛИ				
	3	15	50	85	97
0:0	31,7	32,7	33,9	35,1	36,1
0:11	42,0	43,2	44,6	46,0	47,1
1:0	42,3	43,5	44,9	46,3	47,5
1:11	44,4	45,6	47,0	48,5	49,7
2:0	44,6	45,7	47,2	48,6	49,8
2:11	45,8	47,0	48,4	49,9	51,1
3:0	45,9	47,0	48,5	50,0	51,2
3:11	46,6	47,8	49,3	50,7	51,9
4:0	46,7	47,9	49,3	50,8	52,0
4:11	47,2	48,4	49,9	51,4	52,6
5:0	47,2	48,4	49,9	51,4	52,6

Литература

1. ТР ТС 042/2017. О безопасности оборудования для детских игровых площадок.
2. ГОСТ 34614.1–2019 (EN 1176-1:2017). Оборудование и покрытия игровых площадок. Часть 1. Общие требования безопасности и методы испытаний.
3. Caple, M. Spatial analysis of the mechanical behaviour of natural turf sports pitches / M. Caple, I. James // Bartlett Sports Eng. – 2012. – № 15. – P. 143–157.
3. ГОСТ 34615–2019 (EN 1177:2018+AC:2019). Покрытия ударопоглощающие игровых площадок. Определение критической высоты падения.
4. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.who.int/tools/child-growth-standards/standards/head-circumference-for-age>. – Дата доступа: 28.09.2024.

УДК 665.58

СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ДЛЯ КОСМЕТИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ НА ОСНОВЕ СТАНДАРТА GMP

Жук Т. А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Производство косметической продукции включает множество этапов: разработку, тестирование, упаковку, маркировку и распространение. Это сложный процесс, который требует строгого соблюдения стандартов качества для обеспечения безопасности и эффективности продуктов. Безопасность косметических товаров является предметом глобальной озабоченности, поскольку потребители подвергаются воздействию различных ингредиентов, которые могут оказать неблагоприятное воздействие на их здоровье и благополучие. Внедрение и совершенствование стандартов GMP и ISO способствует повышению конкурентоспособности на рынке, обеспечивая производство высококачественной и безопасной продукции. Это является важным преимуществом в условиях глобализации, где высокие стандарты качества становятся неотъемлемым требованием для производителей косметики.

Ключевые слова: производство косметической продукции, системы менеджмента, GMP, ISO, совершенствование системы менеджмента.

QUALITY MANAGEMENT SYSTEM FOR COSMETIC PRODUCTS BASED ON GMP STANDARD

Zhuk T.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Production of cosmetic products includes many stages: development, testing, packaging, labeling and distribution. It is a complex process that requires strict adherence to quality standards to ensure product safety and efficiency. The safety of cosmetic products is a global concern because consumers are exposed to a variety of ingredients that can have an adverse effects on their health and well-being. The implementation and improvement of GMP and ISO standards helps to increase competitiveness in the marketplace by ensuring the production of high quality and safe products. This is an important advantage in globalization, where high quality standards are becoming an indispensable requirement for cosmetics manufacturers cosmetics manufacturers.

Key words: production of cosmetic products, management systems, GMP, ISO, management system improvement.

*Адрес для переписки: Жук Т. А., пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by*

Современная система менеджмента качества (СМК) – это инструмент управления предприятием, направленный на обеспечение и повышение качества продукции, процессов и услуг. СМК представляет собой организационную структуру, которая объединяет управленческий персонал и процессы контроля качества, реализуемые в соответствии с действующими нормативными актами.

Создание СМК на предприятиях стало необходимым шагом в условиях стремительного роста требований к качеству продукции. Жесткая конкуренция и возрастание роли качества как ключевого фактора конкурентоспособности способствовали переходу компаний от разрозненных методов управления к единой, комплексной системе, учитывающей все аспекты, влияющие на качество.

Сегодня СМК – это полноценная управленческая система, наряду с системами управления персоналом, производством и другими. Внедрение СМК позволяет систематизировать работу по управлению качеством, обеспечивая стабильность характеристик продукции и улучшая процессы на всех этапах производства. Это создает дополни-

тельную гарантию качества для заказчиков, что оказывает позитивное влияние на заключение контрактов и повышает доверие к компании [1].

Производство косметической продукции включает множество этапов: от разработки и тестирования до упаковки и распространения. Этот сложный процесс требует строгого соблюдения стандартов качества для обеспечения безопасности и эффективности продукции. В условиях возрастания требований к качеству и безопасности косметики, система GMP (Good Manufacturing Practice) играет ключевую роль. GMP направлена на регулирование производственных процессов для выпуска безопасной и качественной продукции, что соответствует современным ожиданиям потребителей и требованиям регулирующих органов.

GMP представляет собой комплекс норм и правил, охватывающих все аспекты производственного процесса:

- персонал;
- документацию;
- оборудование;
- помещения;

- технологические процессы;
- упаковку и хранение продукции.

Такой подход помогает избежать дефектов и брака на всех стадиях производства.

Одним из важных отличий стандарта GMP является его комплексный характер: он предусматривает постоянный лабораторный контроль и документирование всех параметров производства.

Это сильно отличает его от обычных процедур контроля, которые охватывают лишь отдельные образцы продукции или партии, что не всегда гарантирует качество всего выпускаемого объема [2].

Ключевыми требованиями GMP являются:

- создание стерильных производственных помещений;
- использование стандартного оборудования;
- четкая регламентация процессов;
- контроль санитарного состояния среды;
- обеспечение качественного сырья;
- упаковочных материалов.

Эти меры направлены на предотвращение контаминации и обеспечение безопасности продукции.

Важность стандартизации процессов в производстве косметики состоит в минимизации рисков, связанных с производственными ошибками, такими как перекрестная контаминация, неправильная маркировка или сбой оборудования. Стандарты, такие как ISO 22716:2007, адаптируют принципы GMP под особенности косметической промышленности, обеспечивая высокое качество и безопасность продукции.

ISO 22716:2007 фокусируется на управлении персоналом, техническими и административными аспектами, а также контроле качества и хранения продукции. В отличие от многих других стандартов, он не накладывает строгих требований на размещение оборудования и технологии, что позволяет учитывать специфику различных видов косметической продукции. Внедрение ISO 22716 совместимо с ISO 9001 и помогает стандартизировать процессы на международном уровне [3].

Соблюдение стандартов GMP гарантирует, что продукция будет безопасной, чистой от примесей и соответствующей заявленным характери-

стикам. Это особенно важно для продукции, предназначенной для детей, беременных женщин и людей с чувствительной кожей, где риск возникновения аллергических реакций и других нежелательных эффектов выше [4].

Переход к работе по принципам GMP мотивирует производителей внедрять эффективные и безопасные процессы, что в долгосрочной перспективе повышает доверие потребителей и укрепляет репутацию бренда. Компании, работающие по стандартам GMP, ассоциируются с высококачественной продукцией, что позволяет им успешно конкурировать на рынке, особенно в условиях ориентации на отечественное производство [5].

Стандарт GMP в производстве косметической продукции играет ключевую роль в обеспечении безопасности и качества. Внедрение международных норм, таких как ISO 22716, минимизирует риски, связанные с производственными процессами, и усиливает доверие потребителей к продукции, что особенно важно в условиях усиленной конкуренции и роста требований к безопасности косметических средств.

Литература

1. Святкина, Л. И. Системы менеджмента качества : учебное пособие / Л. И. Святкина. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2019. – 223 с.
2. Цивов, А. В. Фармацевтическая система качества и надлежащие производственные практики : учебно-методическое пособие / А. В. Цивов, В. Ю. Орлов. – Ярославль : ЯрГУ, 2018. – 48 с.
3. Контроль качества продукции, 2020. – № 8. – 64 с.
4. Гаврилова, Ю. А. Система GMP как инструмент управления качеством и безопасностью продукции / Ю. А. Гаврилова, Е. П. Гаврилова Система // Успехи современного естествознания. – 2014. – № 11 (1). – С. 134–136.
5. Окрепилова, И. Г. Организация менеджмента качества на предприятии : учеб. пособие / И. Г. Окрепилова, А. Ю. Курочкина, Л. Е. Скрипко ; Федер. агентство по образованию, Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования "С.-Петербург. гос. ун-т экономики и финансов", Каф. экономики и упр. качеством. - СПб. : Изд-во С.-Петербург. гос. ун-та экономики и финансов, 2005. – 135 с.

УДК 65.012.61

АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ РИСКА НЕКОРРЕКТНОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ В НАДЗОРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ

Качанова Ю. И., Серенков П. С.

*Белорусский Национальный Технический Университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В надзорной деятельности пищевой продукции критически важно правильно идентифицировать и оценивать риски, чтобы минимизировать вероятность некорректных решений. Практика надзорной деятельности показывает, что, несмотря на наличие целого комплекса мер, риски некорректных результатов надзорной деятельности в области пищевой продукции имеют место. В докладе обосновано решение данной проблемы как реализация системного подхода, заключающегося в том, что поиск всех возможных источников рисков следует осуществлять на основе процессной модели надзорной деятельности. В докладе рассмотрена модель процесса надзора в форме проверки, как потоковая модель операций и техника идентификации источников рисков некорректного принятия решений.

Ключевые слова: надзорная деятельность, безопасность пищевой продукции, процессная модель, идентификация источников рисков.

ANALYSIS OF RISK SOURCES IN INCORRECT DECISION-MAKING IN FOOD PRODUCT SUPERVISION

Kachanova Y., Serenkov P.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. In the supervisory activities of food products, it is critically important to correctly identify and assess risks to minimize the likelihood of incorrect decisions. Supervisory practice shows that despite the presence of a whole range of measures, the risks of incorrect results in supervisory activities in the field of food products exist. The report justifies the solution to this problem as the implementation of a systematic approach, which consists in searching for all possible sources of risks based on the process model of supervisory activities. The report examines the model of the supervisory process in the form of an inspection, as a flow model of operations and a technique for identifying sources of risks of incorrect decision-making.

Keywords: supervisory activities, food safety, process model, identification of risk sources.

*Адрес для переписки: Серенков П. С., ул. Я. Коласа, 22, 518, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: pavelserenkov@bntu.by*

Актуальность темы обусловлена важностью обеспечения безопасности и качества продуктов питания. В условиях глобализации и увеличения объемов производства и потребления пищевой продукции, надзорные органы сталкиваются с множеством вызовов, связанных с контролем и регулированием этой сферы. Некорректные решения могут привести к серьезным последствиям, таким как распространение небезопасных продуктов, ухудшение здоровья населения и снижение доверия к надзорным органам [1].

Исследование источников риска и разработка мер по их минимизации способствует повышению эффективности надзорной деятельности, улучшению качества продуктов питания и защите здоровья потребителей. Таким образом, данное исследование имеет высокую актуальность и значимость для обеспечения общественного благополучия и устойчивого развития пищевой промышленности.

В Республике Беларусь надзорная деятельность осуществляется по Указу Президента Республики Беларусь от 16.10.2009 № 510 «О совершенствовании контрольной (надзорной) деятельности в Республике Беларусь» [2].

Надзор за соблюдением требованиям технических регламентов Таможенного союза, Евразийского экономического союза осуществляется Государственным комитетом по стандартизации Республики Беларусь и областными (по Минской области и г. Минску) инспекциями государственного надзора за соблюдением требований технических регламентов и стандартов и государственного метрологического надзора Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь в формах: проверок; мероприятий технического (технологического, поверочного) характера; мер профилактического и предупредительного характера [2].

Цель надзорной деятельности в пищевой продукции заключается в обеспечении безопасности и качества пищевых продуктов для защиты здоровья населения. Это достигается через [4]:

1. Контроль соответствия: Проверка соответствия пищевых продуктов установленным требованиям, стандартам и нормативам безопасности и качества.

2. Мониторинг и оценка рисков: Постоянный мониторинг и оценка потенциальных рисков, свя-

занных с производством, хранением и реализацией пищевой продукции.

3. Применение корректирующих мер: Внедрение корректирующих мер в случае выявления нарушений или несоответствий для предотвращения возможных угроз здоровью потребителей.

4. Образовательные программы: Проведение образовательных программ и тренингов для производителей и инспекторов с целью повышения их квалификации и осведомленности о современных требованиях и стандартах».

Эти меры способствуют созданию условий для безопасного и качественного питания, что является важным фактором для поддержания здоровья и благополучия населения. Однако практика надзорной деятельности показывает, что риски некорректных результатов надзорной деятельности в области пищевой продукции имеют место. Некорректное принятие решений в надзорной деятельности представляет собой значительную проблему, влияющую на эффективность государственного контроля и надзора. Учитывая экспортный потенциал пищевой отрасли, сложившаяся ситуация требует научно методического решения, позволяющего вовремя принимать превентивные меры, выявлять и устранять узкие места и тем самым избегать негативных последствий реализации риска [3].

Решение данной проблемы видится в реализации системного подхода, заключающегося в том, что поиск всех возможных источников рисков следует осуществлять на основе процессной модели надзорной деятельности. В докладе рассмотрена модель процесса надзора в форме проверки, как потоковая модель операций [1]:

- сбор исходной информации для обоснования назначения проверки;
- уведомление субъекту о проведении выборочной проверки;
- проведение проверки в соответствии с предписанием на ее проведение и законодательством;
- внесение определенных законодательством сведений о проведении проверки в книгу учета;
- проведение проверки в установленные сроки в рабочее время проверяемых субъектов;
- требование у проверяемых субъектов только тех сведений и документов, которые относятся к вопросам, подлежащим проверке;
- проведение отбора образцов в количестве, установленном ТНПА;
- соблюдение законодательства, прав и законных интересов проверяемых субъектов;
- ознакомление представителей проверяемого субъекта с результатами проверки;
- принятие необходимых мер по возмещению вреда, причиненного государству, иным лицам;
- направление предложения о приостановлении деятельности проверяемого субъекта в слу-

чаях выявления нарушений законодательства, создающих угрозу национальной безопасности, причинения вреда жизни и здоровью населения, окружающей среде;

– по результатам проверки, в ходе которой выявлены нарушения актов законодательства, составляется акт проверки [1].

Процессная модель создает основу для идентификации полного комплекса влияющих факторов на результаты проверки. В докладе представлены результаты анализа всех этапов модели. Среди выявленных экспертными методами факторов наиболее влияющими признаны следующие [5]:

- недостаточная квалификация проверяющих;
 - ограниченные сроки проведения проверок;
 - отбор продукции на лабораторные испытания по различным показателям;
 - предвзятость и субъективное мнение;
 - недостаточная коммуникация;
 - избыточная бюрократия;
 - недостаточное использование технологий;
 - неправильное планирование;
- Значимость рисков от воздействия идентифицированных факторов оценивалась с учетом последствий их проявления:
- ухудшение качества продукции;
 - угроза здоровью потребителей;
 - финансовые потери;
 - репутационные потери.

Заключение. Для минимизации рисков всех видов надзорной деятельности необходимо реализация риск-ориентированного системного подхода, в основе которого лежит процессная модель деятельности. Это позволит структурировать процесс проведения проверок, минимизировать ошибки и повысить эффективность надзорной деятельности в пищевой промышленности.

В докладе предложены различные методы риск-ориентированного подхода, применимые для пищевой продукции [6].

Литература

1. Репин, В. В. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов / В. В. Репин, В. Г. Елиферов. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2004. – 408 с.
2. Указ Президента Республики Беларусь от 16.10.2009 № 510 «О совершенствовании контрольной (надзорной) деятельности в Республике Беларусь».
3. Козбаненко, В. А. Основы государственного муниципального управления- 2002– 35 с.
4. ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции». – с. 1.
5. Никаноров, П. А. Управление рисками в менеджменте качества – Санкт-Петербург, 2019 – 105 с.
6. Шухарт У. А. Экономический контроль качества произведенного продукта / У. А. Шухарт. – Вэн Нюстренд К., Нью-Йорк, 1931. – 50 с.

УДК 001.893

РОЛЬ КООРДИНАТНОГО КОНТРОЛЯ В РАЗВИТИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Кубрин Д. С., Гомма М. А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Данная работа посвящена изучению роли координатного контроля в развитии аддитивного производства в условиях развития Индустрии 4.0. Рассматриваются ключевые аспекты координатного контроля, его влияние на качество 3D-печатных изделий.

Ключевые слова: аддитивное производство, координатный контроль, геометрические параметры.

THE ROLE OF COORDINATE CONTROL IN ADDITIVE MANUFACTURING

Kybrun D., Homma M.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. This work is devoted to studying the role of coordinate control in the development of additive manufacturing in the context of the development of Industry 4.0. The key aspects of coordinate control, its impact on the quality of 3D printed products, as well as the possibilities of integrating coordinate control systems into the printing process are considered.

Keywords: additive manufacturing, coordinate control, geometric parameters.

*Адрес для переписки: Кубрин Д. С., ул. Молодежная 31, г.п. Мачулищи 223012, Республика Беларусь
e-mail: dk250036@gmail.com*

Аддитивное производство – это процесс изготовления деталей, который основан на создании физического объекта по электронной модели, путем добавления материала, как правило, слой за слоем, в отличие от механической обработки и традиционного формообразующего производства.

С развитием Индустрии 4.0 и его стремлением к интеллектуальному производству, где система способна самостоятельно принимать решения, аддитивное производство нашло свое применение. Аддитивное производство, более известное как 3D-печать, переживает бурный рост, предлагая революционные возможности в различных отраслях машино- и приборостроения. Так аддитивное производство позволяет повторить сложную геометрию изделия, снизить затраты на производство изделия не только материальные, за счет уменьшения количества отходов при изготовлении традиционным способом, но и финансовые за счет ненадобности дорогостоящего оборудования и найма широкого штата сотрудников. Однако, производство таким методом некоторых изделий как гипоидные передачи, планетарные редукторы и другие, вызывают сложности, связанные с необходимостью обеспечить точный контроль геометрических параметров изделия. Именно в аддитивном производстве координатный контроль позволяет обеспечить необходимую точность.

Координатный контроль в аддитивном производстве – это процесс измерения и анализа геометрических параметров 3D-печатных деталей с помощью специальных измерительных систем. Он включает в себя определение размеров, формы, положения и ориентации детали относительно системы координат.

Различают следующие типы координатного контроля в аддитивном производстве:

1) послепечатный контроль – контроль проводимый непосредственно после завершения печати с использованием координатных измерительных машин и (или) других измерительных систем. Такой вид контроля может осуществляться с помощью лазерных сканеров, высокоточных камер и тактильных датчиков;

2) встроенный контроль – контроль, проводимый непосредственно в процессе печати. Такой вид контроля создает цикл обратной связи, что позволяет динамически корректировать параметры печати. Встроенный контроль может проводиться координатными измерительными машинами и лазерными датчиками с системой LIDAR. Интеграция систем координатного контроля непосредственно в процесс 3D-печати позволяет улучшить точность, качество и эффективность производства.

Координатный контроль оказывает следующие положительные влияния на развитие аддитивного производства:

1) обеспечение точности геометрии – координатный контроль гарантирует соответствие геометрии проектной модели, позволяет определить отклонения формы и расположения;

2) автоматизация контроля – благодаря циклу обратной связи и обработке собранных данных, возможно снижение затрат, увеличение скорости производства, а также снижение влияния человеческого фактора;

3) использование новых материалов – благодаря координатному контролю имеется возможность использовать более широкий спектр материалов, включая различные металлы, сплавы, композиты и керамику, которые требуют высокой точности нанесения. Однако следует заметить, что не все материалы могут использоваться по причине своей высокой температуры плавления,

низким показателем адгезии, высокой вязкостью. Такие материалы как: титан, вольфрам, ниобий, полипропилен и другие, требуют особенной технологии, оборудования и использования специальных составов для обеспечения сцепления изделия с печатной платформой;

4) расширение возможностей единичного производства – координатный контроль позволяет создавать персонализированные изделия, что открывает новые возможности в медицинской отрасли, а также расширяет возможности для будущих исследований;

5) возможность создания изделия для эксплуатации в опасных условиях – координатный контроль позволяет создавать изделия для опасных условий, где имеет место высокие температуры, давления, перегрузки, в отраслях где традиционные методы производства не эффективны. К таким отраслям относятся авиастроение, космическая отрасль.

Хотя координатный контроль имеет важную роль в аддитивном производстве, но у него есть и ряд существенных недостатков, которые в данный момент времени исправить невозможно, а именно:

1) координатный контроль не способен полностью обеспечить необходимое качество изделия, в связи с дефектами, возникающими в результате плохой спекаемости порошка или смолы внутри изделия, а именно: трещинами, металлическими включениями, не спеченными порошками. Данную проблему может решить технология компьютерной томографии;

2) координатный контроль увеличивает время производства из-за его ограничения скорости, обусловленное высокой точностью и плавностью перемещения измерительного щупа;

3) система координатного контроля довольно дорогостоящее и сложное устройство, которое

вынуждает производителя нанимать квалифицированных сотрудников, что в конечном итоге повышает стоимость изделия. Это также ограничивает доступность в приобретений 3D-печатных изделий для некоторых компаний и организаций;

4) влияние на точность тепловых деформаций в результате длительной работы устройства, нагрева печатающей головки, температуры печатного материала, это в конечном итоге снижает точность позиционирования и вынуждает к применению мер компенсации тепловых деформации.

Координатный контроль играет ключевую роль в развитии аддитивного производства, позволяя обеспечивать качество и точность изделий, оптимизировать и автоматизировать производственный процесс, создавать новые возможности для инноваций. Без эффективного координатного контроля аддитивное производство не может достичь своего полного потенциала и преобразовать множество отраслей. Однако открытыми остаются вопросы о структурной целостности 3D-печатных изделий, их внутренних дефектах, что может значительно снизить эффект координатного контроля, а также о времени, затраченном на производство изделия, и как следствие о стоимости конечного изделия.

Литература

1. Канищев М. В. Введение в аддитивные технологии / М. В. Канищев, Л. М. Ульянов. – 1 изд. – Москва: Издательский дом НИТУ «МИСиС», 2023. – 352 с.
2. Измерительное и контрольное оборудование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://hexagon.com/company/divisions/manufacturing-intelligence>.
3. Контрольно-измерительные машины [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ndt.by/news/stati>.

УДК 621.713.12

АНАЛИЗ МЕТОДОВ НОРМИРОВАНИЯ ТОЧНОСТИ ПАРАМЕТРОВ

Кубрин Д. С., Спесивцева Ю. Б.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. При конструировании различных механизмов, машин, приборов и других изделий, проектировании технологических процессов, выборе средств и методов измерений возникает необходимость в проведении размерного анализа, с помощью которого можно установить правильное соотношение взаимосвязанных размеров и определить допустимые рассеяния параметров.

Ключевые слова: размерная цепь, допуск, качество, замыкающее звено, экономическое обоснование.

ANALYSIS OF METHODS FOR NORMALIZING THE ACCURACY OF PARAMETERS

Kubryn D., Spesivtseva Y.

*Belarusian National Technical University,
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. When designing various mechanisms, machines, devices and other products, designing technological processes, choosing measurement tools and methods, it becomes necessary to conduct dimensional analysis, with the help of which it is possible to establish the correct ratio of interrelated dimensions and determine the permissible dispersion of parameters.

Keywords: dimensional chain, tolerance, quality, closing link, economic justification.

*Адрес для переписки: Кубрин Д. С., ул. Молодежная 31, г. п. Мачулищи 223012, Республика Беларусь
e-mail: dk250036@gmail.com*

Современные темпы развития точного приборостроения обуславливают повышение требований к показателям качества приборов самого разного назначения. В этой связи приобретает большее значение совершенствование процесса проектирования, в котором общие идеи сначала превращаются в концептуальные решения, а затем в конкретные требования к параметрам деталей, зафиксированным в конструкторской и технологической документации. При этом считается, что наиболее важным является проектирование параметров, а проблеме назначения допусков, как правило, не уделяется должного внимания.

В настоящее время интерес к этой задаче вырос как в научных исследованиях, так и в промышленности, что объясняется с одной стороны растущими требованиями к себестоимости и качеству продукции, а с другой стороны наличием реальных производственных данных, обусловленных новыми технологиями и возможностями компьютерной техники. Целью работы является анализ методов нормирования точности для выявления текущих проблем и постановки задач для дальнейших исследований.

В литературе имеют место основные направления: минимизация чувствительности отклонений параметров к изменению производственных процессов, применение статистических методов при нормировании точности и использование оптимизации для минимизации затрат.

При разработке продукции должны соблюдаться требования как к функционированию изделия, так и к технологичности изготовления его составляющих и контролепригодности параметров деталей. Традиционно допуски назначаются ме-

тодом аналогов или «проб и ошибок», последовательно приближаясь к обеспечению заданного показателя качества, если допуски принадлежат звеньям размерной цепи. На различных этапах процесса проектирования необходимо обеспечить баланс между частными конфликтующими целями, прежде всего между качеством и стоимостью, при этом минимизации чувствительности допусков к изменению производственных процессов уделяется мало внимания. Руководствуясь этой необходимостью Тагути предложил трехэтапный подход к назначению номинальных значений параметров и допусков:

1) определение характеристик изделия критически важных для его функционирования и достижения целевых показателей качества;

2) выбор для ключевых параметров номинальных значений, которые должны отражать оптимальные условия работы, установление предельных значений, в которых параметр может варьироваться без значительного влияния на качество изделия;

3) проверка полученных значений с точки зрения того, как различные изменения в параметрах влияют на качество, корректировка номинальных размеров и допусков при необходимости.

В дальнейшем он пришел к выводу, что вариация или отклонение от оптимального значения, закончится неизбежными потерями в виде сокращения срока службы изделия, проблемами при его обслуживании. Тагути подчеркнул важность уменьшения вариативности процессов за счет невосприимчивости их к различным источникам шума. Эту процедуру назвали робастным проектированием параметров.

Для определения допусков на параметры может быть использован метод Монте-Карло, основанный на том, что случайные факторы влияют на параметры изделия и его функционирование. Метод основан на моделировании процессов с помощью генератора случайных чисел, что позволяет при помощи статистических методов анализа определить: параметры, которые в большей степени влияют на работу изделия; степень влияния допусков, оптимальные значения допусков с точки зрения себестоимости. Метод имеет ряд серьезных недостатков: необходимость использования специализированных программ, наличие большого количества данных, продолжительный по времени.

Другой подход к назначению допусков связан с расчетом размерных цепей, которые в зависимости от объекта анализа делят технологические, измерительные и конструкторские. Технологические размерные цепи позволяют определить межоперационные размеры с минимально необходимыми припусками исходя из точности детали. Измерительные размерные цепи связывают составляющие погрешности измерения.

Конструкторские размерные цепи позволяют определить допуски параметров деталей, влияющих на функционирование изделия. При решении прямой (проектной) задачи по известному допуску замыкающего звена рассчитываются допуски составляющих звеньев. При этом могут использоваться метод «проб и ошибок», метод равного качества, метод пропорционального влияния; метод равных допусков, которые по своей сути являются стратегиями эмпирического подбора допусков. Каждый из методов назначения допусков имеет свои преимущества. Однако допуски в первую очередь устанавливаются для обеспечения функционирования изделия, при этом стоимость игнорируется или учитывается косвенно, поэтому часто допуски выбираются более жесткими чем необходимо. Косвенно учитывается стоимость в методе «проб и ошибок», когда вначале на основе опыта конструктора назначаются условные допуски, рассчитывается размерная цепь, затем при необходимости допуски корректируются. Метод трудоемкий и не учитывает количественной информации о стоимости.

Определение набора допусков, обеспечивающих работу изделия при минимальной себестоимости его изготовления, является сложной задачей, которой посвящено большое количество исследований [1]. Первые публикации появились тогда, когда возможности компьютеров были ограничены. Кроме этого, есть работы, в которых рассмотрены цель и ограничение меняются местами, т. е. делается попытка повысить уровень качества изделия без превышения заранее определенного лимита затрат.

Укрупненно все исследования в этой области, можно разделить на следующие направления: решение математической задачи оптимизации, построение зависимости стоимости от точности, моделирование базы данных для расчета, создание системы автоматизированного проектирования допусков.

При постановке задачи распределения допусков в виде математической задачи оптимизации детерминированных и стохастических алгоритмов могут быть преодолены недостатки традиционных подходов. Распределение допусков должно осуществляться автоматически с учетом количественной информации о точности и стоимости изготовления отдельных звеньев размерной цепи.

Тип целевой функции влияет на выбор алгоритма оптимизации и его результаты. Линейные функции удобны для решения, но как правило, не описывают большинство реальных зависимостей. При их линеаризации появляются дополнительные ошибки аппроксимации, поэтому целесообразнее совершенствовать алгоритмы оптимизации, в том числе с возможностью многокритериальной оптимизации.

Большинство исследований основывается на данных, опубликованных в небольшом количестве изданий, и в основном эта информация ограничена изготовлением конкретных конструктивных элементов. Часто реальные производственные данные не доступны по причине их конфиденциальности.

Традиционно считается, что если отклонения параметров находятся в допустимых пределах, то изделия считаются годными. Но неоптимальное распределение допусков можно рассматривать как потерю качества для потребителя.

Таким образом, назначение допусков с учетом их стоимостной реализации является наиболее обоснованным, но для широкого применения такого подхода нужна информация о зависимостях «точность-стоимость» для самых разнообразных конструктивных элементов деталей с разными физико-механическими свойствами. Желательно также чтобы затраты, которые не поддаются прямому измерению, были также учтены. Создание модели «точность-стоимость» является трудоемкой и сложной задачей, но при использовании ее в массовом производстве может быть обеспечено конкурентное преимущество.

Литература

1. Roth, M. From tolerance allocation to tolerance-cost optimization: a comprehensive literature review / M. Roth, B. Schleich, S. Wartzack // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – № 107. – С. 1–54.

УДК 006.91:061.2/4

ОСНОВНЫЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНОВЫХ ПРОДУКТОВ

Кулуев Р. Р.

*Ташкентский государственный технический университет им. И. А. Каримова
Ташкент, Республика Узбекистан*

Аннотация. исследованы основные характеристики устройств для поточного контроля влажности зерна и зерновых продуктов, а так же расчеты основной и дополнительной погрешности средств измерений.

Ключевые слова: контроль, измерение, методика, качество, показатели.

MAIN METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF CAPACITIVE MOISTURE CONVERTERS OF GRAIN PRODUCTS

Kuluev R.

*Tashkent State Technical University named after I. A. Karimov
Tashkent, Republic of Uzbekistan*

Abstract. The main characteristics of devices for in-line control of moisture content of grain and grain products, as well as calculations of the main and additional error of measuring instruments are investigated.

Key words: control, measurement, methodology, quality, indicators.

*Адрес для переписки: Кулуев Р. Р., ул. Университетская, 2, Ташкент 700095, Республика Узбекистан
e-mail: webmail.tdtu.uz*

В результате теоретических и экспериментальных исследований определены статические характеристики разработанного прибора при разных значениях калибровочных частот $f_{\text{кал}} = 774,173$ кГц и $f_{\text{кал}} = 766,200$ кГц, а также нормированные метрологические свойства. Вычислены предельные значения допускаемых погрешностей устройства в диапазоне $W \in [3...20]$. Результаты экспериментального исследования приведем на рисунках 1 и 3. По результатам экспериментальных исследований построены графики зависимости выходной частоты измерительного генератора рисунки 2 и 4.

№	Среднее значение $\Sigma W, \%$	f_1, kHz	f_2, kHz	f_3, kHz	Средняя частота Σ, kHz
1	3,10	666,653	666,633	666,644	666,643
		3,00	3,20	3,10	
2	5,00	660,661	660,652	660,644	660,652
		5,1	5,0	4,95	
3	7,85	654,544	654,725	653,698	654,322
		7,84	7,86	7,85	
4	10,15	642,886	642,961	644,550	643,465
		10,16	10,13	10,15	
5	12,65	631,568	631,558	631,570	631,565
		12,65	12,64	12,66	
6	13,75	622,366	622,523	622,380	622,423
		13,73	13,77	13,75	
7	17,25	599,899	599,971	599,991	599,953
		17,25	17,26	17,24	
8	20,25	571,419	571,409	571,425	571,417
		20,26	20,24	25,25	

Рисунок 1 – Показания прибора при калибровочной частоте $f_{\text{кал}}=774,173$ кГц, $m_{\text{пробы}} = 170$ гр.

Анализ показывает, что в емкостных преобразователях высокое быстродействие по сравнению с индуктивными, тепловыми и другими типами преобразователей и постоянная временная может составлять значения $T = (0,01-0,1 \text{ с})$.

С точки зрения надежности емкостные преобразователи также имеют высокие показатели, и вероятностная оценка полной надежности емкостного преобразователя может составлять $P = 0,96$.

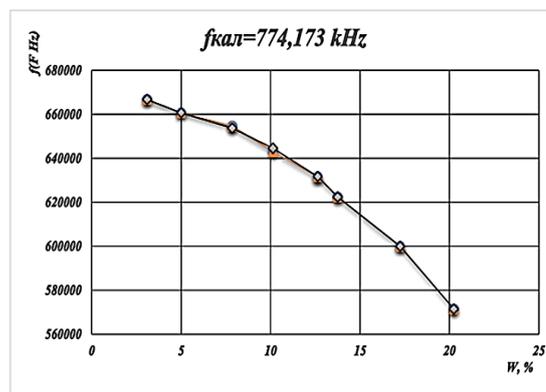


Рисунок 2 – График зависимости выходной частоты $f_{\text{кал}}=774,173$ кГц от влажности $W \%$ зерна

№	Среднее значение $\Sigma W, \%$	f_1, kHz	f_2, kHz	f_3, kHz	Средняя частота Σ, kHz
1	5,00	656,925	656,203	656,171	656,433
		3,20	3,00	3,10	
2	7,85	648,623	648,627	648,627	648,625
		7,84	7,86	7,85	
3	10,15	639,921	638,243	639,365	639,176
		10,15	10,16	10,14	
4	12,65	624,872	623,406	624,129	624,135
		12,66	12,64	12,65	
5	13,75	616,214	618,457	617,203	617,291
		13,75	13,77	13,74	
6	17,25	590,172	591,700	590,786	590,886
		17,24	17,25	17,26	

Рисунок 3 – Показания прибора при калибровочной частоте $f_{\text{кал}}=766,200$ кГц, $m_{\text{пробы}}=170$ гр.

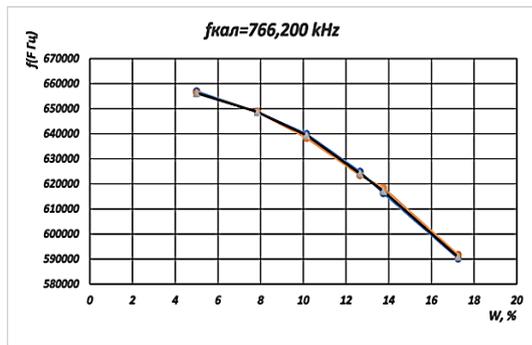


Рисунок 4 – График зависимости выходной частоты $f_{квал} = 766,200$ кГц от влажности W % зерна

Таблица – Результаты экспериментального исследования

τ (s)	W (20 %)	W (16 %)	W (13 %)
2	4,1	3,4	2,7
4	10,9	9,2	7,4
6	14,5	13,2	10,5
8	17,2	14,9	11,3
10	19,3	15,6	12,2
12	19,7	15,8	12,6
14	19,8	16,1	12,8
16	20,1	16,1	13,1

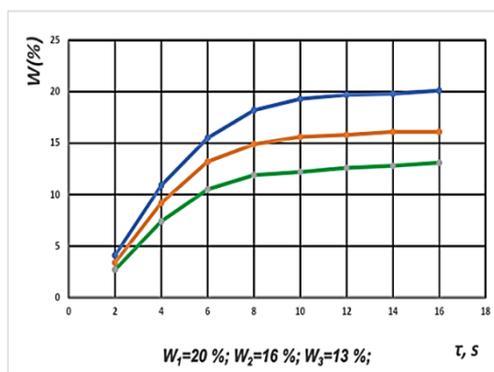


Рисунок 5 – Динамическая характеристика зависимости времени от влажности конструкции поточного емкостного влагомера сыпучих материалов для образцового зерна с влажностью $W_1 = 20$ %, $W_2 = 16$ % и $W_3 = 13$ %

В работе было указано, усовершенствования метода и типа преобразователей для непрерывного контроля влажности сыпучих материалов нами разработана конструкция поточного емкостного влагомера сыпучих материалов. Результаты экспериментального исследования приведены в таблице. По результатам экспериментального ис-

следования построены графики зависимости (рисунок 5) и определены динамические характеристики данного устройства.

Из представленного графика, построенного по результатам данного эксперимента, мы видим, что функция зависимости устройства от времени видна в уравнении (1):

$$y = 0,011x^3 - 0,435x^2 + 5,767x - 5,8214 \quad (1)$$

По результатам эксперимента из графика видно, что динамическая характеристика данного устройства может достигать стабильной измерительной константы при 10 с.

Емкостные устройства, которые используются сегодня, являются достаточно сложными системами. Конкретными примерами здесь могут послужить усилители, а также генераторы:

- начальной емкостью (1):

$$C_0 = f(\varepsilon) = f(\varepsilon), F; \quad (1)$$

- максимальным изменением емкости (2):

$$\pm \Delta C = f(\pm \Delta \varepsilon) = f(\pm \Delta \varepsilon), F; \quad (2)$$

- реактивным сопротивлением (3.3):

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C_0}, \Omega, \quad (3)$$

где $\pi = 3,1416$; f – частота питающего напряжения, Гц;

- активным сопротивлением: R_c, Ω

- активными потерями (4):

$$\text{tg} \delta = f(R_c, C_0, \omega), \quad (4)$$

где $\omega = 2\pi f, \text{c}^{-1}$;

- электрической постоянной времени (5):

$$\tau = R_c C_0, \text{c}; \quad (5)$$

- чувствительностью преобразования (6):

$$\gamma = f(\Delta C, C_0); \quad (6)$$

Литература

1. Булгаков, Р. А., Обзор электрофизических свойств семян пшеницы и их применение в методах контроля / Р. А. Булгаков, Н. Н. Барышева // Ползуновский альманах. – 2018. – № 4. – С. 205–207.
2. Федорова, Р. А. Биохимические особенности свойств зерна : учеб.-метод. пособие / Р. А. Федорова. – СПб: Университет ИТМО, 2016. – 41 с.
3. Барышева, Н. Н. Метод контроля всхожести семян пшеницы по изменению мембранного потенциала / Н. Н. Барышева, С. П. Пронин // Ползуновский вестник. – 2015. – № 2. – С.69–73.

УДК 006.91:004

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОВЕРКИ С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЗАЦИИ

Кушнер М. В., Токарь О. В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация: Определены действия для совершенствования метрологического обеспечения поверки лаборатории с помощью автоматизации.

Ключевые слова: поверочная лаборатория, автоматизация, поверка, программное обеспечение.

IMPROVING METROLOGICAL SUPPORT FOR VERIFICATION USING AUTOMATION

Kushner M., Tokar O.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract: Actions have been identified to improve metrological support for laboratory verification using automation.

Key words: calibration laboratory, automation, verification, software.

Адрес для переписки: Токарь О. В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: tokar.o@bntu.by

Целью работы является совершенствование метрологического обеспечения поверки лаборатории ОАО «Минский часовой завод» с помощью автоматизации на базе программы «Метролог СИ 2.3» для автоматизации метрологического обеспечения поверки средств измерений.

В процессе работы были выявлены существующие программные комплексы для обеспечения автоматизации поверочной лаборатории, проанализированы их возможности, проведена экспертная оценка их качества на основе квалиметрического подхода, осуществлена автоматизация в конкретных направлениях, например, автоматизирован метрологический учет средств измерений, автоматизирована подготовка графиков и отчетов.

Поверочная лаборатория предприятию необходима для работ по метрологической оценке средств измерений. Внедрение программного обеспечения необходимо для снижения бумажного оборота в лаборатории, для оперативной доступности всей необходимой документации поверителю, что позволит вносить коррективы в информацию о средстве измерения.

Область деятельности поверочной лаборатории ОАО «Минский часовой завод» в Национальной системе аккредитации Республики Беларусь определена областью аккредитации на право проведения поверки средств измерений, указанных в приложении к Аттестату аккредитации № ВУ/112 3.0090 от 30.12.1997 г.

Область деятельности распространяется на проведение поверочных работ:

- средств измерений для ОАО «Минский часовой завод»;
- средств измерений, выпускаемых ОАО «Минский часовой завод»;
- средств измерений по заявкам сторонних организаций и предприятий в пределах области аккредитации и технических возможностей.

Правовой основой деятельности лаборатории является «Положение о поверочной лаборатории», утвержденное заместителем директора предприятия, согласно которому одной из обязанностей является соответствие СТБ 2542-2021.

За 2023 год в поверочной лаборатории осуществлялась поверка манометров типа МТП, МТТ в количестве 7464.

Существует несколько видов программного обеспечения для автоматизации поверки в поверочной лаборатории:

1. Программный комплекс «ДЕЛЬТА-СИ», который соединим с автоматизированной информационной системой для фиксирования результатов поверки «Метрконтроль», позволяет проводить автоматизированный учет средств измерений и прочих средств автоматизации на предприятии. Автоматизированное рабочее место метролога позволяет вести базу данных средств измерения предприятия, осуществлять просмотр, создание и редактирование паспортов средств измерения.

При добавлении средства измерения в программе указываются обязательные данные (заводской номер, тип средств измерений, вид измерений, состояние средства измерения, сфера применения, владелец, позиция, на которой установлен данный прибор), кроме того механически согласно нормативной документации указывается период метрологической оценки. Можно внести информацию о диапазоне, единицах измерения и характеристике точности.

2. Программный комплекс «Calibri», который предназначен для упрощения поверки и калибровки манометров, датчиков давления и преобразователей. В программу добавляются сведения о приборе и об эталонном приборе. При осуществлении поверки (калибровки) можно указать самостоятельно или автоматически добавить генерацию контрольных точек. По определенной метро-

логом методике расчета неопределенности «Calibri» вычислит неопределенность. Так же метролог сам определяет шаблон протокола, свидетельства и извещения, которые сгенерирует программный комплекс по итогу поверки. Имеется опция «Календарь», которая классифицирует приборы на ряд категорий в связи со сроками до наступления плановых испытаний.

3. Программный комплекс «Метролог СИ 2.3», который предназначен для обеспечения метрологического учета в соответствии с требованиями законодательной метрологии. Здесь реализованы функции создания, редактирования и обработки информации, а также передачи данных, фотографий и электронных документов по локальной сети.

Программа предназначена для автоматизации всех работ по ведению учета и планирования поверок средств измерений. Основные функции: сбор и обработка данных о наличии, состоянии и движении средств измерения, получение статистической информации, составление планов и графиков, ведение истории изменения, включая эксплуатацию и ремонты средств измерений, формирование отчетов различной структуры.

Программные комплексы дают возможность оптимизировать рабочее время, перераспределив его на работу с оборудованием и рассмотрение сопроводительной документации.

Для выбора программного обеспечения для автоматизации поверки были привлечены пять экспертов-специалистов в области метрологии, знакомых с работой в предложенных программах. Был рассчитан коэффициент конкордации ($W = 0,62$), значение которого показывает высокую согласованность мнений экспертов.

Для комплексной оценки программного обеспечения были отобраны его свойства на основании существующих разработок [1, 2] и проведен расчет весовых коэффициентов M_i методом парных сравнений (таблица 1).

Таблица 1 – Значения весовых коэффициентов

Свойства	M_i
1. Функциональное разнообразие	0,16
2. Доступность интерфейса	0,20
3. Удобство в использовании	0,22
4. Простота обучения пользованию программой	0,22
5. Требования к устройству, на которое будет установлено программное обеспечение	0,20

Метод парных сравнений позволяет провести сравнение предъявляемых характеристик попарно с помощью матрицы парных сравнений, в которой каждый эксперт предоставляет номер предпочитаемой характеристики в каждой паре, затем подсчитывается частота предпочтений в строке и столбце, суммарная частота и количество проведенных экспертами сравнений.

Из таблицы 1 видно, что значимость свойств примерно одинаковая, но удобство в использовании и простота обучения пользованию программой имеют более высокие значения коэффициента весомости.

Экспертная оценка качества трех программных комплексов для автоматизации поверочной лаборатории проводилась с использованием пятибалльной шкалы (1 – очень плохо; 2 – плохо; 3 – средне; 4 – хорошо; 5 – очень хорошо).

Уровень качества программных комплексов определялся комплексным методом [3] на основе средневзвешенного арифметического показателя по формуле $Q = \sum M_i \times K_i$, где M_i – коэффициент весомости; K_i – показатель качества.

Значения показателей качества уровня качества для оцениваемых программных комплексов (ПК) представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Уровень качества Q для объектов

ПК	Свойство 1	Свойство 2	Свойство 3	Свойство 4	Свойство 5	Q
1	2,8	3,4	2,2	3,8	4,0	3,2
2	4,2	3,4	3,2	2,8	3,0	3,3
3	3,6	3,6	2,8	4,0	3,8	3,6

Комплексная оценка трех программ для автоматизации показала, что «Метролог СИ 2.3» (ПК № 3) является лучшим среди конкурентов. Таким образом, программа «Метролог СИ 2.3» является достаточно актуальной для внедрения ее в поверочную лабораторию, так как она позволяет автоматизировать процесс поверки средств измерения на рабочем месте метролога и упростить его работу в целом.

Выделены направления, которые для поверочной лаборатории являются самыми актуальными для автоматизации. В итоге для поверочной лаборатории ОАО «Минский часовой завод» с помощью программы «Метролог СИ 2.3» были автоматизированы метрологический учет средств измерений, подготовка графиков и отчетов.

Литература

1. Ларин, С. Н. Модели и методы экспертной оценки характеристик качества интерфейса пользователя инновационных программных продуктов / С. Н. Ларин, В. В. Юдинова, Н. Н. Юрятина // Символ науки. – 2016. – № 4. – С. 118–123.
2. Ларин, С. Н. Методы, состав показателей и алгоритм проведения экспертной оценки качества инновационных программных продуктов / С. Н. Ларин, Е. В. Жиликова // Инновационная наука. – 2015. – № 4. – С. 73–76.
3. Соколовский С. С. Методы менеджмента качества. Квалиметрия / Минск: БНТУ, 2009. – 166 с.

УДК 621.317.799:621.382

ИЗМЕРЕНИЕ ЗАРЯДА ЗАТВОРА СИЛОВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Лисенков Б. Н.

ОАО «МНИПИ»,
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлена методика измерения полного заряда затвора Q_g , заряда затвор-исток Q_{gs} и заряда затвор-сток Q_{gd} силового МОП транзистора.

Ключевые слова: заряд затвора постоянным током, плато Миллера.

MEASURING THE GATE CHARGE OF POWER TRANSISTORS

Lisenkov B.

JSC «MNIPI»
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The paper presents a technique for measuring the total gate charge Q_g , gate-source charge Q_{gs} , and gate-drain charge Q_{gd} of a power MOSFET.

Keywords: gate charge with constant current, Miller plateau.

Адрес для переписки: Лисенков Б. Н., ул. Я. Коласа, 73, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: lisenkovmniipi@tut.by

Основное применение изделий силовой электроники связано с преобразованием электроэнергии, причем его эффективность увеличивается с увеличением частоты. Это ставит задачу развития методов и средств измерения динамических параметров силовых приборов. Кроме того, для обеспечения надежности в жестких условиях эксплуатации, встает задача измерения этих параметров при воздействии на объект подверженный испытаниям (ОПИ) внешних влияющих факторов (ВВФ), в частности температуры и радиации.

Большое влияние на скорость переключения силовых МОП транзисторов и ее изменение в условиях ВВФ оказывает заряд затвора, необходимый для включения транзистора. Заряд затвора, как правило, указан в качестве одной из основных технических характеристик силовых МОП транзисторов.

В работе представлена методика, которая позволяет определить заряд затвор-исток Q_{gs} , заряд затвор-сток Q_{gd} и полный заряд затвора Q_g силового МОП транзистора на основании заряда его затвора постоянным током. Подобный принцип использован в современном анализаторе динамических параметров силовых полупроводниковых приборов PD1500A фирмы Keysight (США) [1].

Согласно методике, на затвор испытуемого МОП транзистора в течение импульса одновибратора длительностью τ подают постоянный ток от регулируемого источника тока, как показано на рисунке 1. Для определенности здесь рассмотрен транзистор с n -каналом. Для транзистора с p -каналом направление токов и полярность напряжений меняются.

При отсутствии импульса, затвор ОПИ замкнут через транзистор T на корпус. Форму сигналов напряжения V_{gs} , V_{dd} и тока I_d , возникающих под действием импульса, наблюдают с помощью осциллографа.

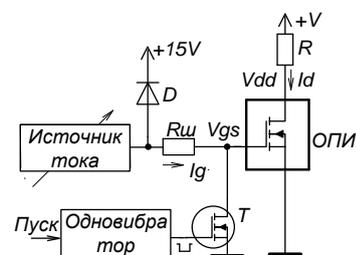


Рисунок 1 – Схема измерения заряда затвора

Диод D ограничивает максимальное напряжение на затворе ОПИ ($<15,5$ В). Резистор $R_{ш}$ позволяет измерить постоянный ток I_g , после его регулировки, с помощью внешнего вольтметра. Несколько номиналов резистора $R_{ш}$ входят в комплект измерителя в качестве сменных шунтов.

Постоянное напряжение $+V$, поступающее на сток ОПИ через резистор R , можно изменять от 12 В до 120 В. В качестве резистора R , задающего ток I_d используют соответствующие сменные нагрузки из комплекта измерителя. Возможность регулировки $+V$ и I_d позволяет исследовать зависимость заряда затвора ОПИ от напряжения на стоке и силы тока.

На рисунке 2 представлены диаграммы сигналов V_{gs} , V_{dd} и I_d в соответствующих точках схемы, приведенной на рисунке 1. Момент t_0 отмечает начало импульса одно-вибратора.

С момента t_0 до момента t_2 напряжение на затворе V_{gs} линейно нарастает. При этом увеличивается заряд затвора относительно стока и истока транзистора. Однако, с целью упрощения, этот заряд относят только к емкости затвор-исток и называют зарядом затвор-исток Q_{gs} .

В момент t_2 нарастание напряжения V_{gs} прекращается и, вплоть до момента t_3 , линия V_{gs} выходит на плато Миллера, на рисунке 2 это $V_{GS(pl)}$.

Заряд затвора Q_{gd} , возникающий на этом интервале, относят к емкости затвор-сток.

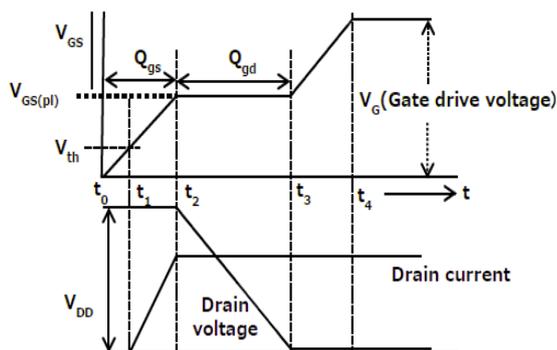


Рисунок 2 – Диаграммы сигналов на электродах ОПИ при измерении

В момент t_1 напряжение на затворе ОПИ достигает порогового значения V_{th} , транзистор начинает открываться, а ток I_d нарастать. С этого момента напряжение на стоке начинает уменьшаться. С момента t_2 спад V_{dd} становится линейным вплоть до момента t_3 , когда транзистор открывается полностью.

Момент t_4 отмечает окончание импульса одновибратора и окончание процесса заряда затвора. Полный заряд затвора Q_g за это время будет равен произведению постоянного тока, поступающего на затвор, за время заряда $\tau = t_4 - t_0$.

С практической точки зрения, значение полного заряда затвора важно знать при том напряжении V_{gs} когда силовой МОП транзистор гарантировано включится в условиях ВВФ.

Как правило, максимальное значение напряжения на затворе составляет ± 20 В, но, с учетом требований надежности, разработчики аппаратуры выбирают его в диапазоне от ± 10 В до ± 15 В. Большинство изготовителей нормируют значение полного заряда затвора при напряжении на затворе ± 10 В.

Согласно предлагаемой методике силу постоянного тока I_g регулируют так, чтобы в момент t_4 напряжение V_{gs} достигло значения при котором транзистор будет открыт, например, +10 В. Поскольку на затвор транзистора поступает постоянный ток, накапливаемый на нем полный заряд затвора Q_g в кулонах равен произведению силы постоянного тока I_g в амперах на длительность интервала заряда в секундах. С целью упрощения расчета, длительность интервала заряда (длительность импульса одновибратора) выбрана равной $1 \cdot 10^{-4}$ с.

Для иллюстрации методики измерения и расчета, на рисунке 3 представлена осциллограмма V_{gs} (2В/дел, 10 мкс/дел.) при тестировании МОП транзистора IRFP4137.

На основании осциллограммы, напряжение V_{gs} в момент окончания заряда составляет 10 В (2В/дел \times 5дел). При этом на $R_{ш}$ (1 кОм \pm 1%), рисунок 1, мультиметром измерено падение напряжения 0,865 В.

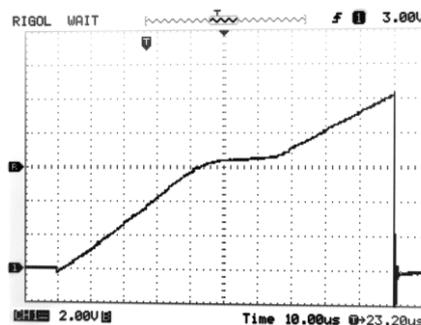


Рисунок 3 – Осциллограмма напряжения V_{gs}

Находим ток затвора $I_g = 0,865 \text{ В} / 10^3 \text{ Ом} = 8,65 \cdot 10^{-4} \text{ А}$. При этом полный заряд затвора равен $Q_g = 8,65 \cdot 10^{-4} \text{ А} \times 10^{-4} \text{ с} = 86,5 \text{ нК}$. Эта величина соответствует диапазону допустимых значений Q_g для IRFP4137 (от 83 нК до 125 нК).

Меняя соответствующим образом I_g , согласно методике, можно измерить Q_{gs} и Q_{gd} .

Разработанная схема и методика измерения заряда затвора реализованы в макете измерителя динамических параметров силовых полупроводниковых приборов, внешний вид которого и технические характеристики, при измерении времени включения и выключения, силовых транзисторов представлены ранее [2].

Макет измерителя изготовлен в единичном экземпляре для исследований влияния ВВФ на динамические параметры силовых МОП транзисторов в ЦКП «Радиационный центр» при ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению». Стабильность параметров силовых транзисторов, режим работы которых зачастую сопоставим с их предельными возможностями, должна быть высокой, поскольку даже небольшие изменения их параметров под действием ВВФ увеличивают вероятность отказа аппаратуры в жестких условиях эксплуатации.

Литература

1. PD1500A Series Dynamic Power Device Analyzer/Double-Pulse Tester for discrete IGBT, SiC, and GaN devices, data sheet [электронный ресурс]. – Режим доступа: www.keysight.com/find/PD1500A.
2. Лисенков, Б. Н. Измерение динамических параметров полупроводниковых приборов / Б. Н. Лисенков // Материалы 16-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение–2023», Минск, 15–17 нояб. 2023 г. – Минск, БНТУ. – 2023 – с. 58–60.

УДК 006.91

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ОБЩЕСТВА

Лужинская А. И., Гомма М. А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация: Газ остается одним из основным источником энергии для различных категорий и групп потребителей. Метрологическое обеспечение является неотъемлемой частью безопасной и эффективной эксплуатации объектов газотранспортной системы (ГТС). Надежные материальные поставки природного газа от газовых месторождений до конечных потребителей с обеспечением достоверного коммерческого учета при сведении небаланса газа к минимуму возможны лишь в рамках единой системы газоснабжения. **Ключевые слова:** метрологическое обеспечение, газотранспортная система, поверка, калибровка.

METROLOGICAL SUPPORT IN THE OPERATION OF THE FACILITIES OF THE COMPAN'S GAS TRANSMISSION SYSTEM

Luzhinskaya A., Homma M.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract: Gas remains one of the main sources of energy for various categories and groups of consumers. Metrological support is an integral part of safe and efficient operation of gas transmission system (GTS) facilities. Reliable material supplies of natural gas from gas fields to end consumers with reliable commercial metering and minimising gas imbalance are possible only within the framework of a unified gas supply system

Keywords: metrological support, gas transmission system, verification, calibration.

Адрес для переписки: Лужинская А. И., пр. Независимости, 168/3, г. Минск 220141, Республика Беларусь
e-mail: alex.andriya.l.y@gmail.com

При использовании объектов газотранспортной системы необходимо проводить измерения, которые будут гарантировать точность и надежность. Это является важным аспектом для эффективного управления и контроля за процессами в газовой отрасли.

Основными принципами организации метрологического обеспечения комплексного учета газа в единой системе газоснабжения, позволяющим решить поставленные задачи и минимизировать небаланс газа и возможные потери при поставках, являются:

– поуровневый узловый учет, включая газодобывающие (ГДО), газотранспортные (ГТО) организации и конечных потребителей;

– построение системы метрологического обеспечения комплексного учета газа с учетом действующей нормативной базы, обоснованного выбора методов и средств измерений, существующего поверочного и эталонного оборудования;

– повсеместный (тотальный) учет (измерение) у конечных потребителей

– применение телеметрии, обеспечивающей централизацию и автоматизацию сбора данных о потреблении со всех уровней.

Метрологическое обеспечение при эксплуатации объектов газотранспортной системы является важным аспектом, который обеспечивает точность и надежность измерений, необходимых для эффективного управления и контроля за процессами в газовой отрасли.

Точные и достоверные измерения параметров газа (давление, расход, состав) необходимы для:

1. Безопасности: контроля давления в трубопроводах, предотвращения аварийных ситуаций.

2. Экономической эффективности: точного учета потребления и поставки газа, оптимизации работы газопроводов.

3. Соблюдения законодательства: соответствия нормативным документам в области метрологии [1].

Основными элементами метрологического обеспечения являются:

1. Нормативно-техническая документация: регламенты, технические условия, ГОСТы, стандарты по метрологии.

2. Метрологическое оборудование: приборы для измерения параметров газа (манометры, расходомеры, газоанализаторы), средства поверки и калибровки.

3. Служба по метрологии: специалисты, отвечающие за метрологическое обеспечение, проводящие поверку и калибровку оборудования, анализ результатов измерений.

4. Система управления метрологией: документированные процедуры, регламентирующие деятельность метрологической службы, обеспечивающие контроль и управление процессами метрологического обеспечения.

Основные задачи метрологического обеспечения:

– поверка и калибровка метрологического оборудования: проведение периодических проверок и калибровок оборудования, обеспечение его точности и соответствия установленным требованиям;

– контроль за состоянием метрологического оборудования: мониторинг работоспособности

оборудования, своевременное выявление и устранение неисправностей;

– анализ результатов измерений: обработка и интерпретация данных, полученных с помощью метрологического оборудования, выявление отклонений и тенденций;

– обеспечение качества метрологических работ: внедрение системы менеджмента качества, контроль соблюдения нормативных требований;

– обучение персонала: проведение обучения сотрудников по вопросам метрологии, повышение их квалификации.

Основные требования к метрологическому обеспечению:

– точность измерений: соответствие результатов измерений установленным требованиям по точности;

– достоверность измерений: отсутствие систематических и случайных ошибок в результатах измерений;

– своевременность измерений: проведение измерений в установленные сроки;

– соответствие законодательству: соблюдение всех нормативных требований в области метрологии.

Метрологическое обеспечение объектов магистральных газопроводов включает следующие мероприятия:

– систематический анализ состояния и применения СИ, аттестованных методик выполнения измерений, рабочих эталонов и соблюдения метрологических правил и норм, и разработку на его основе мероприятий по совершенствованию метрологического обеспечения;

– создание и внедрение современных методов и СИ;

– разработку и внедрение национальных стандартов и стандартов организации;

– метрологическую экспертизу проектов стандартов, технических заданий на проектирование, конструкторской, технологической и другой НД;

– аттестацию методик выполнения измерений;

– испытания и внедрение СИ;

– контроль за состоянием, применением и ремонтом СИ, за соблюдением метрологических правил и норм;

– информационное обеспечение метрологических служб»;

– поверку и калибровку СИ;

– подготовку и повышение квалификации кадров [2].

Примеры метрологического оборудования, используемого в ГТС:

– Манометры: для измерения давления газа в трубопроводах.

– Расходомеры: для измерения расхода газа в газопроводах.

– Газоанализаторы: для определения состава газа (например, содержание метана, этана, пропана).

– Средства поверки и калибровки: для проверки точности и калибровки метрологического оборудования [3].

Обеспечение точности и достоверности измерений является ключевым фактором для обеспечения безопасности, экономической эффективности и соблюдения законодательства.

В состав (в содержание) работ по видам технического обслуживания и ремонта контрольно-измерительных приборов, автоматики и телемеханики линейной части магистральных газопроводов входят:

– оборудование системы телемеханики, установленное на линейной части магистральных газопроводов. Работы по калибровке СИ системы ТМ в рамках проведения ТР (калибровка датчиков давления, калибровка датчиков температуры, калибровка измерительных каналов, корректировка параметров вторичных блоков приборов после проведенной калибровки, инициализация параметров с верхнего уровня системы ТМ после проведенной калибровки датчиков давления, температуры и измерительных каналов, составление актов проведения калибровки измерительных каналов, датчиков давления и температуры);

– техническое обслуживание и ремонт контрольно-измерительных приборов и автоматики газораспределительной станции. Работы по калибровке СИ системы ТМ в рамках проведения ТО 6;

– техническое обслуживание и ремонт контрольно-измерительных приборов в автоматике газоизмерительной станции. Работы по калибровке СИ системы ТМ в рамках проведения ТО 6;

– техническое обслуживание и ремонт контрольно-измерительных приборов и автоматики узла редуцирования газа [4].

Метрологическое обеспечение играет ключевую роль в обеспечении безопасности и эффективности газотранспортной системы. Оно включает в себя комплекс мероприятий, направленных на повышение точности измерений, контроль за состоянием оборудования и соблюдение всех необходимых стандартов и норм.

Литература

1. Закон Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений» от 5 сентября 1995 г. № 3848-ХП в ред. от 11 ноября 2019 г., вступил в действие с 26 ноября 2020 г.

2. СТО Газпром 2-3.5-454-2010 Правила эксплуатации Магистральных газопроводов: утвержден и введен в действие Распоряжением ОАО «Газпром» от 24 мая 2010 г. № 130. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data1/53/53416/?ysclid=m1naek7ub7997198478>.

3. ВРД-39-0.10-006-2000. Правила технической эксплуатации магистральных газопроводов. – М.: ИРЦ Газпром, 2000. – 218 с.

4. СТО Газпром 2-3.5-051-2006. Нормы технологического проектирования магистральных газопроводов. – М.: ИРЦ Газпром.

УДК 006.91

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ МЕТРОЛОГИИ

Лужинская А. И., Гомма М. А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Основные направления четвертой промышленной революции в технологиях – цифровизация, интернет вещей, киберфизические системы. Необходимым условием их развития является цифровая трансформация, которая потребует, в частности, метрологического обеспечения многократно возросшего парка средств измерений и опережающего развития метрологии на основе прогноза измерительных потребностей.

Ключевые слова: цифровая трансформация, метрология и метрологическое обеспечение, управление качеством.

DIGITAL TRANSFORMATION OF METROLOGY

Luzhinskaya A., Homma M.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract: The main directions of the fourth industrial revolution in technologies are digitalisation, the Internet of Things, and cyber-physical systems. The necessary condition for their development is digital transformation, which will require, in particular, metrological support of the multiply increased fleet of measuring instruments and advanced development of metrology based on the forecast of measurement needs.

Key words: digital transformation, metrology and metrological support, quality management.

Адрес для переписки: Лужинская А. И., пр. Независимости, 168/3, г. Минск 220141, Республика Беларусь
e-mail: alex.andriya.l.y@gmail.com

Научно-технический прогресс является одной из базовых черт современного общества. К настоящему времени, мы подошли к реализации уникального адаптированного интеллекта, который является неотъемлемой частью нашей жизни.

Процессы цифровизации и интеллектуализации оказывают глубокое влияние на все сферы жизни, и метрология не исключение. При интеграции цифровых технологий в метрологию появляются новые возможности для повышения качества, доступности и точности измерений [1].

Цифровая метрология в настоящее время отличается от традиционной, которая была актуальна еще пару лет назад. Раньше получить сведения о соответствии характеристик измерительных приборов требованиям можно было только в период проведения поверки, которая может проводиться один раз в год или несколько лет. О том, что происходит с теми или иными приборами в рамках межповерочного интервала, исправны ли они, почему и когда именно вышли из строя, не знали и узнать практически не могли. Юридически поверенное средство измерений считается исправным до следующей поверки, но по факту может работать некорректно. А это в свою очередь влечет экономические потери в самых различных отраслях. К примеру, в сфере ЖКХ из-за искажения данных приборов учета потребления ресурсов, тех же счетчиков воды или электроэнергии, будут терять деньги и потребители, и компании поставщики. В промышленности некорректная работа средств измерений приведет к браку выпускаемой продукции. Сбой в работе приборов, контролирующих выброс загрязняющих веществ

в атмосферу, воду или землю, может и вовсе обернуться экологической катастрофой. Если же не исправен эталон, то все соподчиненные измерения будут недостоверны и ущерб станет распространяться в геометрической прогрессии. Цифровая метрология позволяет избежать всех этих негативных явлений

Концепция цифровой трансформации, сформулированная в интересах «Индустрии 4.0» для метрологии включает пять основных задач:

- цифровую трансформацию метрологических услуг, в том числе создание инфраструктуры для цифровых сертификатов калибровки, создание «метрологического облака»;
- метрологию в анализе больших данных – разработку методов их анализа и машинного обучения для BigData;
- метрологию коммуникационных систем нового поколения, в том числе для сетей 5G;
- метрологию интеллектуальных средств измерений – самонастройку и самокалибровку;
- метрологию для моделирования и виртуальных приборов.

Ключевыми элементами в цифровой трансформации в метрологии являются:

1. Интернет вещей (IoT). Подключение измерительных приборов к сети позволяет собирать и анализировать данные в режиме реального времени, оптимизировать процессы, прогнозировать отказы и повышать эффективность.
2. Большие данные (Big Data). Анализ больших объемов данных, полученных с помощью IoT-устройств, позволяет выявлять тренды, оптимизировать процессы и повышать точность измерений.

3. Искусственный интеллект (AI). Применение алгоритмов машинного обучения позволяет автоматизировать процессы обработки данных, выполнять прогнозные модели, улучшать качество и точность измерений.

4. Облачные технологии. Хранение и обработка данных в облаке обеспечивает доступ к информации из любой точки мира, повышает безопасность данных и снижает затраты на инфраструктуру.

5. Цифровые двойники. Создание виртуальных моделей реальных объектов позволяет моделировать и оптимизировать процессы, повышать точность измерений и сокращать время на разработку и тестирование.

6. Блокчейн. Обеспечивает прозрачность и неизменность данных, повышает доверие к результатам измерений и упрощает обмен информацией между участниками процесса [2].

Главными преимуществами цифровой трансформации в метрологии выделяют:

1. Повышение точности и надежности измерений.
2. Увеличение производительности труда и повышение эффективности.
3. Уменьшение расходов.
4. Дополнительные меры безопасности.
5. Расширение возможностей.

Негативные последствия цифровой трансформации в метрологии.

1. Существует ряд факторов, которые влияют на безопасность данных. В связи с этим возникает необходимость в обеспечении защиты данных от несанкционированного доступа и кибератак.

2. Совместимость и ее значение. Системы и устройства, которые имеют различные характеристики, должны быть совместимыми между собой.

3. Кадры. Необходимо обучать специалистов работе с цифровыми технологиями.

4. Стоимость. Внедрение цифровых технологий может быть дорогостоящим.

5. Направления регулирования. Следует разработать правовую базу, которая будет регулировать использование цифровых технологий в метрологии [3].

Процесс цифровой трансформации в метрологии представляет собой комплексный процесс, включающий не только внедрение новых технологий, но и пересмотр существующих способов управления, обучения, взаимодействия и обеспечения безопасности. Если будет происходить успешное преодоление существующих проблем и внедрение инновационных технологий, то это может обеспечить устойчивое будущее метрологии [4].

Литература

1. Донченко, С. И. Обеспечение единства измерений в процессе цифровой трансформации экономики / С. И. Донченко // Альманах современной метрологии. – 2018. – № 16. – С. 7–9.
2. Киселев, М. И. Цифровая экономика и четвертая промышленная революция – новые вызовы или дань времени? / М.И. Киселев, А.С. Комшин, А.Б. Сырицкий // Стандарты и качество. – 2018. – № 4. – С. 62–66.
3. Юдина, М. А. Индустрия 4.0: Перспективы и вызовы для общества / М. А. Юдина // Государственное управление. Электронный вестник. – 2017. – № 60. – С. 197–215.
4. Попов, А. А. Цифровизация обеспечения метрологической прослеживаемости средств измерений и стандартных образцов через облачные технологии: современное состояние и перспективы развития / А. А. Попов // Эталоны. Стандартные образцы. – 2022. – № 3.

УДК 004.89, 537.87

**МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ ЭКГ-СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ДИФРАКЦИОННОГО
ДЕСКРИПТОРА И ТЕХНОЛОГИЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ**

Мигель А. С., Малый С. В., Черепанова Ю. В.

*Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Предложена методика классификации ЭКГ-сигналов на основе спектра пространственных гармоник, образованных в результате рассеяния плоской электромагнитной волны на периодической решетке, профиль которой совпадает с репрезентативным комплексом электрокардиограммы для одного или нескольких стандартных отведений, и технологий глубокого обучения. Приведена оценка точности предложенной диагностической системы.

Ключевые слова: электрокардиограмма, дифракционный дескриптор, нейронная сеть, классификация.

**ECG SIGNAL DIAGNOSIS TECHNIQUE BASED ON DIFFRACTION DESCRIPTOR AND DEEP
LEARNING TECHNOLOGIES**

Migel A., Maly S., Cherepanova Y.

*BelaRussian Federation State University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. A technique of ECG-signals classification based on the spectrum of spatial harmonics formed as a result of scattering of a plane electromagnetic wave on a periodic grating, the profile of which coincides with a representative electrocardiogram complex for one or several standard leads, and deep learning technologies is proposed. The accuracy of the proposed diagnostic system is evaluated.

Key words: electrocardiogram, diffraction descriptor, neural network, classification.

*Адрес для переписки: Мигель А. С., пр. Независимости, 4, Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: MihelAS@bsu.by*

Разработка систем диагностики состояния сердечно-сосудистой системы является одной из актуальных проблем медицинского приборостроения.

Электрокардиография является важным и информативным методом неинвазивной диагностики. Анализ ЭКГ-сигналов позволяет получить информацию о состоянии сердечно-сосудистой системы человека. Широко используемая на практике ручная технология обработки ЭКГ-сигналов требует существенных временных затрат и зависит от квалификации врача. Поэтому разработка автоматизированных диагностических систем является важной и актуальной задачей.

Одним из перспективных направлений автоматизированного анализа и классификации ЭКГ-сигналов является использование технологии глубокого обучения искусственных нейронных сетей [1]. В качестве входной информации в таких системах используются ЭКГ-сигналы в графическом или оцифрованном виде. Эффективность обучения нейронных систем и точность диагностики зависит от выбора информационных признаков, характеризующих ЭКГ-сигналы.

В работе [2] предложен оригинальный подход к анализу ЭКГ-сигналов, основанный на использовании в качестве информационных параметров сигнала вектор (дифракционный дескриптор), состоящий из амплитуд распространяющихся гармоник, образованных при дифракции плоской электромагнитной волны на металлической периодической решетке, профиль периода которой совпадает с репрезентативным комплексом ЭКГ-сигнала.

Представляет интерес разработка автоматической диагностической системы на основе дифракционных дескрипторов и технологий глубокого обучения.

В качестве модели системы рассматривалась полносвязная нейронная сеть, ориентированная на разделение ЭКГ-сигналов на два класса: «Норма» или «Нарушение».

Нейронная сеть имела следующую архитектуру: входной слой; полносвязный слой (64 нейрона); dropout слой ($p = 0,5$); полносвязный слой (128 нейрона); dropout слой ($p = 0,5$); полносвязный слой (64 нейрона); dropout слой ($p = 0,5$); выходной слой. В качестве функции активации использовалась «ReLU», а для выходного слоя – «Sigmoid». Метод оптимизации – «Adam». Функция потерь – бинарная кроссэнтропия.

На вход сети поступало 4 дифракционных дескриптора, соответствующих 4 отведениям ЭКГ-сигнала: II, AVF, V1 и V5.

Размерность выходного слоя равнялась единице: 0 – соответствовало «Норма», а 1 – «Нарушение».

Объем выборки данных, на которых проводилось обучение сети, составлял 24 800 объектов, причем 80 % этих данных использовалось для обучения, а 20 % – для оценки качества обучения сети. Нейронная сеть обучалась на протяжении 50 эпох.

Формирование набора данных для обучения, содержащего дифракционные дескрипторы, включало два этапа:

1. Формирование периодов решеток: обработка ЭКГ-сигналов и формирование

усредненных кардиоциклов. ЭКГ-сигналы загружались из открытых наборов данных электрокардиограмм, представленных в 12 отведениях [3–6].

2. Расчет дифракционных дескрипторов методом конечных элементов. Рассматривалась задача дифракции плоской электромагнитной волны ТЕ-поляризации на периодической решетке, профиль которой совпадает с ЭКГ-сигналом. Отношение периода решетки к длине волны равнялось $d/\lambda = 3$, а отношение высоты элементов решетки к длине волны $h/\lambda = 1,5$.

Для выбранных волновых размеров решетки и направления распространения падающей электромагнитной волны дифракционный дескриптор для каждого отведения включал в себя амплитуды распространяющихся пространственных гармоник 0-го, ± 1 и ± 2 порядков. В общем, для повышения чувствительности дифракционного дескриптора к особенностям ЭКГ-сигнала можно варьировать волновые размеры периода и режим возбуждения решетки, изменяя при этом количество элементов дескриптора.

На рисунке 1 представлены примеры периодов решеток, профили которых образованы из ЭКГ-сигналов II отведения.

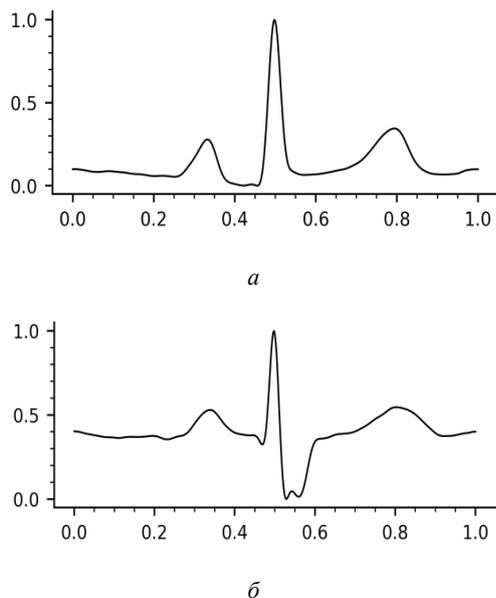


Рисунок 1 – Периоды решеток, соответствующие «Норме» (а) и «Нарушению» (б)

На рисунке 2 представлены дифракционные дескрипторы сигналов, периоды которых представлены на рисунке 1.

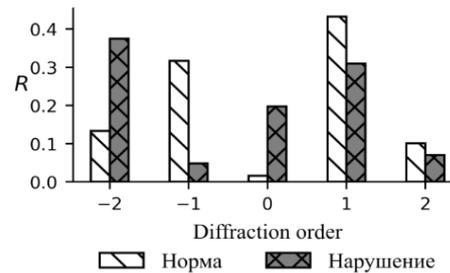


Рисунок 2 – Дифракционные дескрипторы

В результате тестирования обученной нейронной сети получена оценка точности классификации 85 %.

К преимуществам предлагаемой технологии классификации следует отнести:

- системный подход к анализу информации, содержащейся в ЭКГ-сигналах всех или заданного набора отведений;
- радикальное уменьшение объема входной информации, на основе дифракционных дескрипторов, для обучения нейронных сетей.

Точность классификации может быть повышена за счет увеличения объема обучающей выборки, оптимизации режимов формирования и размерности дескрипторов.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований № Ф23М-043.

Литература

1. A systematic review and Meta-data analysis on the applications of Deep Learning in Electrocardiogram / N. Musa [et al.] // *J Ambient Intell Human Comput.* – 2023. – V. 14. – P. 9677–9750.
2. Maly, S. V. Diffraction analysis of ECG / S. V. Maly, M. M Liventseva // *In IFMBE Proceedings, Health in the Information Society (MEDICON and HEALTH TELEMATICS 2004, X Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering, 31 July – 5 August, 2004, Ischia, Italy.* – 2004. – V. 6.
3. An open access database for evaluating the algorithms of ECG rhythm and morphology abnormal detection / F. F. Liu [et al.] // *Journal of Medical Imaging and Health Informatics.* – 2018. – V. 8. – P. 1368–1373.
4. CODE-15%: a large scale annotated dataset of 12-lead ECGs / A. H. Ribeiro [et al.] – 2021.
5. MedalCare-XL: 16,900 healthy and pathological synthetic 12 lead ECGs from electrophysiological simulations / K. Gillette [et al.] // *Sci Data.* – 2023. – V. 10.
6. Wagner, P. PTB-XL, a large publicly available electrocardiography dataset / P. Wagner [et al.] // *Sci Data.* – 2020. – V. 7.

УДК 65.011

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАЗРЫВОВ МОДИФИКАЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ
СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Митягина М. Н.

*Национальный исследовательский университет ИТМО
Санкт-Петербург, Российская Федерация*

Аннотация. В работе представлен анализ особенностей развития элементов систем с применением модели связи итераций жизненного цикла, в основе которой находится сцепление логистических траекторий совершенствования технологий. Описана необходимость развертывания новой итерации, а также обоснование перехода на новую ветвь цикла. В результате предложен подход к визуализации комплексного показателя качества в форме лепестковой диаграммы для принятия решений о целесообразности развития технологий.

Ключевые слова: жизненный цикл, логистическая кривая, развитие технологий, модификация, показатели качества.

**MODELING TECHNOLOGICAL GAPS IN MODIFICATIONS OF COMPLEX TECHNICAL
SYSTEMS ELEMENTS**

Mityagina M. N.

*National Research University ITMO
Saint Petersburg, Russian Federation*

Abstract. The article presents an analysis of the development features of system elements using a life cycle iteration linkage model based on the coupling of technology improvement logistic trajectories. The need for deploying a new iteration is described, as well as the rationale for moving to a new cycle branch. As a result, an approach to visualizing a comprehensive quality indicator in the form of a petal diagram is proposed for making decisions on the feasibility of technology development.

Key words: life cycle, logistic curve, technology development, modification, quality indicators.

Адрес для переписки: Митягина М. Н., Кронверкский пр., д. 49, лит. А, г. Санкт-Петербург 197101, Российская Федерация, e-mail: mitkam2002@yandex.ru

Проектирование сложных систем представляет собой процесс определения системных элементов, а также механизмов их взаимодействия, направленных на достижение стратегической цели посредством реализации тактических операций. Обоснование необходимости применения каждого конкретного компонента системы основано на плановых показателях, предиктивная оценка которых подразумевает определение функциональных состояний элементов и степень их влияния на целевой результат цепочки создания ценности. Зачастую проектирование реализуется в несколько итераций для поиска оптимальных сочетаний, поскольку динамика приращения характеристик элементов зависит от ряда закономерных, а также случайных явлений [1]. Таким образом, ключевой составляющей принятия управленческих решений при планировании процессов является актуализация структурно-функциональных характеристик элементов для повышения показателей эффективности и результативности системы в целом.

Моделирование зависимости показателей системы от затрат реализуется с применением различных функций жизненного цикла: линейной, квадратичной или кусочной. Исходя из выбранного подхода к анализу траектории можно сделать вывод о пройденных фазах системы на ос-

нове ситуационных показателей. При этом прогностическая составляющая данного анализа связана с моделированием логистической функции Ферхюльста $Q(z)$, отражающей динамику развития характеристик:

$$Q(z) = \frac{1}{1 - e^{-z}}, \quad (1)$$

где z – независимая переменная [2].

График исследуемой функции также известен в качестве S-образной кривой технологии из-за особенностей визуального отображения. Значение же модели можно трактовать следующим образом: развитие технологии является кумулятивным и ограниченным. Однако имеющийся инновационный потенциал может стать драйвером развертывания новой итерации в жизненном цикле. Визуально прикрепление технологических траекторий можно изобразить так, как это представлено на рисунке 1.

Движение по логистической кривой описывает переходные состояния модели жизненного цикла модификации. Целесообразность замещения технологии связана с невозможностью ее развития вследствие исчерпания резервов, заложенных при проектировании. Переход на новую итерацию основан на интеграции в систему дополнительных ресурсов для нивелирования нулевого приращения результирующих харак-

теристик, обеспечивающих технические и социальные требования.

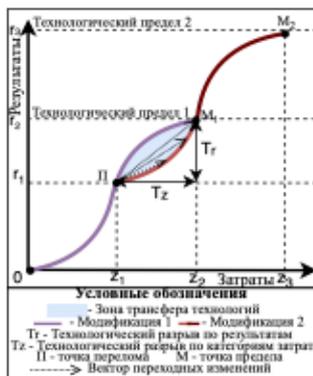


Рисунок 1 – Модель жизненного цикла в несколько итераций [3]

Разница потенциалов модификаций – разрыв T , описываемый отклонением показателей между замещаемой и замещающей технологией с позиций [4]:

- целевых параметров эффективности и результативности $T_r = r_2 - r_1$;
- объема затрат, необходимого для достижения новой технологией уровня показателей старой $T_z = z_2 - z_1$.

По характеру технологический разрыв можно классифицировать как:

- сдвиг T^C : изменение единичных показателей качества в пределах одной группы по ГОСТ 22851-77;
- скачок T^S : изменение ряда единичных показателей качества в нескольких группах или трансформация, обеспечивающая переход на значительно более высокий качественный уровень.

Визуализация комплексного показателя реализуется через моделирование областей качества модификаций с применением лепестковой диаграммы. На рисунке 2 показан фрагмент графика, на котором представлены комплексные показатели качества для трех переходных состояний модификации.

Вектор переходных изменений образуется на основании показателей перехода: сдвига или скачка. Разрыв, как разница между поколениями модификаций, выражен на начальном этапе освоения новой технологии и проявляется в ситуации, при которой результаты хотя и могут быть по степени незначительными, но фактически требуют

высоких затрат [5]. Однако после прохождения первичной стадии наступает рост, в ходе которого отдача замещающей технологии будет значительно превышать замещаемую из-за разницы перспектив адаптации в конкурентной среде.

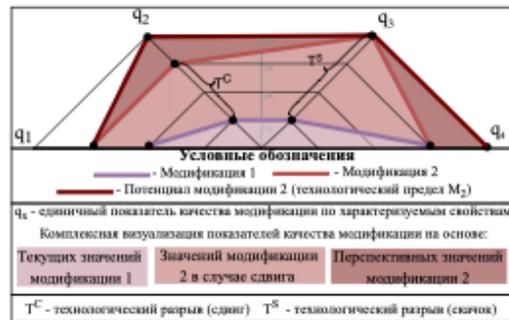


Рисунок 2 – Фрагмент диаграммы визуализации технологического уровня модификаций

Практическая значимость модели заключается в визуализации нормированных показателей качества, на основании которых формируется комплексный функциональный показатель элемента, являющийся определяющим индикатором для принятия решения о реинжиниринге процессов системы.

Литература

1. Митягина, М. Н. Квалиметрические шкалы для оценки показателей элементов организационной среды // Метрологическое обеспечение инновационных технологий : Сборник статей VI Международного форума, Санкт-Петербург, 01 марта 2024 года / Под ред. В. В. Окрепилова. – СПб: ГУАП, 2024. – С. 499.
2. Kudryashov, N. A. Method of the Logistic Function for Finding Analytical Solutions of Nonlinear Differential Equations / N. A. Kudryashov // Modeling and Analysis of Information Systems. – 2015. – № 22(1). – P. 23–37.
3. Митягина, М. Н. Детерминанты управления изменениями в условиях проявления патологических признаков организационных элементов / М. Н. Митягина, С. А. Назаревич // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: V Всероссийская научная конференция. Сборник докладов, СПб, 18 апреля 2024 года. – ГУАП, 2024. – С. 194–198.
4. Управление организацией: учебник / Под ред. А. Г. Поршнева, З. П. Румянцева, Н. А. Саломатина. – 2-е изд. – М: ИНФРА-М, 1999. – 669 с.
5. Попов, М. Е. Технология и ее роль в инновационном развитии общества / М. Е. Попов // Вестник Донского государственного технического университета. – 2011. – Т. 11, № 8–2(59). – С. 1356–1371.

УДК 666.3.017

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОЦЕНКИ СИЛЫ СЦЕПЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КЛЕЙКИХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ЛЕНТ С ПОДЛОЖКОЙ

Монич С. Г., Иоффе К. В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной работе рассмотрено устройство испытания клеевых соединений, а именно клейких изоляционных лент при их сцеплении с подложкой, которые часто применяются для склеивания и герметизации механических конструкций. Этот тип соединений является предпочтительным из-за того, что клеи имеют множество преимуществ по сравнению с другими способами соединения. Выполнение клеевых соединений зависит от различных факторов, среди которых именно вид обработки поверхности играет жизненно важную роль в подготовке поверхности адгезивов. По определению технологии обработки поверхности создают желаемую текстуру поверхности, т. е. оптимизированную в геометрическом смысле, неориентированной структуры и устанавливают энергетические условия поверхностного слоя, под которыми подразумевается равномерное энергетическое состояние на всей поверхности области клеевого соединения.

Ключевые слова: лента, клей, адгезионная прочность, устройство, испытание

A DEVICE FOR EVALUATING THE ADHESION STRENGTH OF VARIOUS ADHESIVE INSULATING TAPES TO A SUBSTRATE

Monich S., Ioffe K.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. In this paper, we consider a device for testing adhesive joints, namely adhesive insulating tapes when they adhere to a substrate, which are often used for gluing and sealing mechanical structures. This type of connection is preferred due to the fact that adhesives have many advantages over other connection methods. The performance of adhesive joints depends on various factors, among which it is the type of surface treatment that plays a vital role in preparing the surface of adhesives. By definition, surface treatment technologies create the desired surface texture, i. e. geometrically optimized, of an undirected structure and establish the appropriate energy conditions of the surface layer, by which we mean a uniform energy state on the entire surface of the adhesive joint area.

Key words: tape, glue, adhesive strength, device, test.

Адрес для переписки: Монич С. Г., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: sgmonich@bntu.by

В последние годы использование клейких лент получило широкое распространение в различных электронных, инженерных, оптических, биомедицинских, ядерных, космических и других отраслях. Такое широкое распространение объясняется тем, что довольно часто материалы в монолитной форме не подходят для разнообразных и специальных требований, и клейкие ленты дают положительный эффект. Клейкие ленты используются для многих и разнообразных целей: для обеспечения устойчивости к истиранию, эрозии, коррозии, истиранию, потускнению, износу, радиационному повреждению или высокотемпературному окислению; для снижения трения или электрического сопротивления, обеспечения смазки, предотвращения прилипания; а также для обеспечения особых магнитных или диэлектрических свойств [1].

Независимо от их предполагаемого использования, свойства, структура, функциональные характеристики и эксплуатационные характеристики зависят, в частности, от адгезии между покрытием и подложкой. Ниже перечислены некоторые из основных причин, подчеркивающих важность адгезии тонких нитей [2].

Адгезия определяется как обратимая работа, выполняемая при создании единичной площади границы раздела между двумя веществами А и В. Она определяется следующим образом [4]:

$$W_{AB} = Y_A + Y_B - Y_{AB},$$

где W_{AB} – обратимая работа адгезии, Y_A – удельная поверхностная свободная энергия вещества А, Y_B – удельная поверхностная свободная энергия вещества В, а Y_{AB} – межфазная удельная свободная энергия. Это определение просто основано на изменении свободной энергии системы до и после контакта между А и В [3, 5].

Более распространенными терминами для этого являются «прочность сцепления» или «прочность адгезии». Экспериментально адгезия может быть измерена двумя способами:

1) в терминах сил, определяя силу сцепления как максимальную силу на единицу площади, оказываемой при разделении двух материалов;

2) альтернативно, в терминах работы или энергии, определяя работу адгезии как работу, выполняемую при разделении или отрыве двух материалов друг от друга.

Все механические методы используют те или иные средства удаления клейкой ленты с подложки. Эти методы могут быть в целом классифицированы на две категории в зависимости от способа отрыва клейких лент [6]:

1) методы, включающие отрыв, перпендикулярный к границе раздела (к границе раздела лента-подложка прикладывается сила возрастающей величины до тех пор, пока граница раздела не будет нарушена. Либо измеряется максимальная приложенная сила, либо используется какой-либо другой критерий, такой как площадь отслоения, для обозначения адгезии. В этих способах делается попытка отсоединить клейкую ленту в направлении, перпендикулярном границе раздела, так что при разрыве границы одновременно отделяется вся область клейкой ленты. Если вся площадь не отделена одновременно, то расчет сил имеет вид более сложный вид).

2) способы, предусматривающие боковое отслоение клейкой ленты от границы отслаивания (эти способы не так популярны, как метод прямого отрыва, но в некоторых случаях испытание на сдвиг внахлест лучше моделирует реальные условия нанесения клейких лент, поэтому результаты этого теста могут быть более значимыми. Измеренное напряжение сдвига – это тангенциальная сила на единицу площади, необходимая для разрыва связи между клейкой лентой и подложкой. Экспериментальная схема показана на рисунке 1, 2).

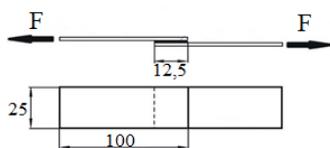


Рисунок 1 – Условие нагружения и размеры клейких лент

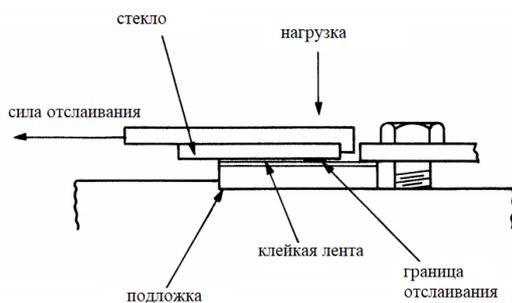


Рисунок 2 - Экспериментальная схема испытания на сдвиг внахлест между клейкой лентой и подложкой

На рисунке 3 приведена принципиальная схема созданного устройства определения усилия отслаивания образца гибкого материала от жесткой пластины с саморегулируемым поддержанием угла отслаивания. На массивном основании 1 на подшипниках качения 16 смонтирована подвижная горизонтальная каретка 2, на которой с помощью резьбовых прихватов закреплена жест-

кая пластина 3. На ее поверхности приклеен испытуемый образец гибкого материала 4, свободный конец которого закреплен в захвате 5. Посредством зацепов 6 последний жестко связан с тензометрическим датчиком усилия 7, который закреплен на каретке 8. На вертикальной стойке 14 устройства, которая для придания ей большей жесткости дополнительно соединена с основанием планкой 15, закреплен электродвигатель постоянного тока 10 с встроенным редуктором, вал которого посредством муфты 11 соединен с ходовым винтом 12. При вращении последнего с помощью передачи «винт-гайка» 13 каретке сообщается поступательное движение в направлении вертикальной оси по направляющим скольжения 9, которое создает усилия отслаивания испытуемого образца от жесткой пластины.

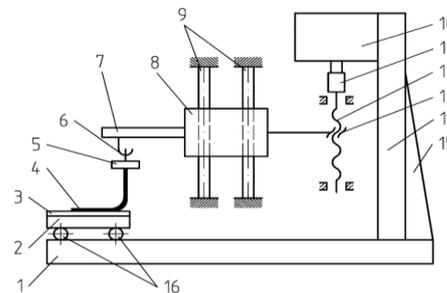


Рисунок 4 –Принципиальная схема устройства определения усилия неравномерного отслаивания образца гибкого материала от жесткой пластины с саморегулируемым поддержанием угла отслаивания 90°

Величина этого усилия за время отслаивания фиксируется тензометрическим датчиком и далее через усилитель подается на цифровой запоминающий осциллограф UTD2052CL. Изменение направления движения каретки обеспечивается реверсированием вращения вала электродвигателя, а регулирование скорости ее движения – изменением напряжения, подаваемого на него от блока питания UT3005E-3.

Изучение адгезионных способностей изоляционных лент имеет большое значение для многих сфер деятельности человека. Разработка новых и усовершенствование существующих устройств для изучения этого параметра позволяет повысить качество и надежность материалов, а также обеспечить безопасность и долговечность технических систем.

Литература

1. Surface Topography Effect on Strength of Lap Adhesive Joints after Mechanical Pretreatment / W. Zielecki // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2013. – № 13(2). – P. 175–185.
2. Polyamide 6 Surface Layer Following Ozone Treatment / M. Kłonica // International Journal of Adhesion and Adhesives. – 2016. – № 64. – P. 179–187.
3. Кузьмин, Д. С. Методы оценки адгезии в электротехнических системах / Д. С. Кузьмин // Электротехника и материалы. – 2021. – № 3. – С. 45–50.

4. Орешкин, Н. А. Современные устройства для испытания изоляционных материалов / Н. А. Орешкин // Вестник технических наук. – 2020. – № 5. – С. 65–72.

5. ГОСТ 20477-86. Материалы изоляционные электротехнические. Метод испытания адгезионной прочности. – М.: Стандартиформ. – 2016.

6. Жданов, О. В. Анализ адгезионных свойств полимерных лент в электротехнической промышленности / О. В. Жданов // Вопросы науки и техники. – 2018. – № 4. – С. 34–42.

УДК 551.501.793

АНАЛИЗ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОСТИ ТРАНСМИССОМЕТРАМИ

Назаренко П. Н.

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе представлены результаты анализа методических погрешностей измерения метеорологической оптической дальности (МОД) трансмиссометрами. Полученные для погрешностей измерения МОД уравнения позволяют решить как прямую задачу расчета зависимостей погрешностей измерения МОД от абсолютной погрешности измерения коэффициента пропускания атмосферы $\Delta\tau$, длины измерительной базы a и МОД, так и обратную задачу определения $\Delta\tau$, a и границ измерения МОД при заданных требованиях к предельно допустимым погрешностям измерения МОД.

Ключевые слова: трансмиссометр, метеорологический оптический диапазон, пропускание атмосферы, измерительная база, погрешность измерений.

ANALYSIS OF METHODOLOGICAL ERRORS IN MEASURING METEOROLOGICAL OPTICAL RANGE BY TRANSMISSOMETERS

Nazarenko P.

SSPA «Optics, Optoelectronics and Laser Technology»
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The paper presents the results of the analysis of methodical errors in measuring the meteorological optical range (MOR) by transmissometers. The equations obtained for the MOR measurement errors allow solving both the direct problem of calculating the dependences of the MOR measurement errors on the absolute measurement error of the atmospheric transmittance coefficient $\Delta\tau$, the length of the measuring base a and MOR, and the inverse problem of determining $\Delta\tau$, a and the limits of MOR measurement under specified requirements for the maximum permissible errors of MOR measurement.

Key words: transmissometer, meteorological optical range, atmospheric transmittance, measuring base, measurement error.

Адрес для переписки: Назаренко П. Н., пр. Независимости, 78–54, г. Минск 220012, Республика Беларусь
e-mail: npr05@mail.ru

Метод измерения метеорологической оптической дальности (МОД) оптическими трансмиссометрами заключается в непосредственном измерении коэффициента пропускания атмосферы, соответствующим измерительной базе с последующим преобразованием измеренного коэффициента пропускания в МОД [1, 2].

За метеорологическую оптическую дальность (МОД) принимается длина пути светового луча в атмосфере, на котором световой поток ослабляется до 0,05 его первоначального значения. Отношение между МОД (метеорологической дальностью видимости) и показателем ослабления с использованием закона Кошмидера выражается в виде [2]:

$$MOR = a \frac{\ln 0,05}{\ln \tau} = - \frac{2,996 a}{\ln \tau}, \quad (1)$$

где MOR – метеорологическая оптическая дальность, τ – коэффициент пропускания атмосферы, a – длина измерительной базы.

Данное уравнение является основным уравнением для определения МОД. Из данного уравнения видно, что границы измеряемой МОД определяются границами измеряемого диапазона пропускания атмосферы τ_{min} и τ_{max} и длиной измерительной базы a .

Уравнение (1) позволяет провести оценку границ диапазона МОД в пределах метрологического диапазона спектрального коэффициента направленного пропускания (СКНП) от 0,1 до 99 % [3]. Соответствующие диапазоны МОД зависят от длины измерительной базы (a) и составляют 0,44 a –300 a .

Преобразование измеренного трансмиссометром коэффициента пропускания в МОД сопряжено с некоторыми особенностями, связанными с логарифмической зависимостью между указанными параметрами, что не обеспечивает преобразование коэффициента пропускания в МОД с одинаковой точностью во всем диапазоне измерения. Поэтому другим фактором, определяющим

границы измеряемого диапазона МОД, являются требования к точности измерений МОД.

Дифференцирование уравнения (1) позволяет получить связь между относительной погрешностью измерения МОД и погрешностью измерения коэффициента пропускания атмосферы:

$$\frac{\Delta MOR}{MOR} = -\frac{\Delta \tau}{\tau \ln \tau}, \quad (2)$$

где ΔMOR – абсолютная погрешность измерения МОД, MOR – метеорологическая оптическая дальность, τ – коэффициент пропускания атмосферы, $\Delta \tau$ – предел допускаемых абсолютных погрешностей измерения коэффициента пропускания атмосферы.

Из уравнения (2) видно, что относительная погрешность зависит только от коэффициента пропускания атмосферы τ и погрешности его измерения $\Delta \tau$. Абсолютная погрешность ΔMOR зависит и от длины измерительной базы:

$$\Delta MOR = 2,996 a \frac{\Delta \tau}{\tau \ln^2 \tau}. \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) позволяют определить методические относительную и абсолютные погрешности измерения МОД в зависимости от коэффициента пропускания атмосферы. Однако, в большинстве случаев требования к точности измерений МОД определяются диапазоном МОД. Преобразование уравнений (2) и (3) позволяет получить следующие уравнения для относительной и абсолютной погрешностей:

$$\Delta MOR/MOR = MOR \frac{\exp\left(\frac{2,996 a}{MOR}\right)}{2,996 a} \Delta \tau, \quad (4)$$

$$\Delta MOR = MOR^2 \frac{\exp\left(\frac{2,996 a}{MOR}\right)}{2,996 a} \Delta \tau. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) позволяют оценить границы диапазонов МОД, в которых обеспечивается требуемая точность измерений.

Трансисометры как средство измерений относятся к спектрофотометрам. В соответствии с ГОСТ 8.557–2007 пределы допускаемых абсолютных погрешностей рабочих спектрофотометров в диапазоне измерений от 0,01 до 0,99 составляют:

- от 0,0015 до 0,0030 при передаче размера единицы от вторичных эталонов;
- от 0,003 до 0,020 при передаче размера единицы от рабочих эталонов.

На рисунке 1 в качестве примера приведены графики расчетных зависимостей методических относительных погрешностей МОД от МОД на измерительной базе 35 мм для трех значений $\Delta \tau$: 0,0015 (0,15 %), 0,003 (0,3 %) и 0,02 (2 %). В качестве верхней границы диапазона относительной

погрешности МОД 40 % приняты рекомендации ИКАО [2] к точности измерения видимости +20 % при значениях МОД свыше 1500 м. Из полученных зависимостей видно, что на границах диапазона коэффициентов пропускания атмосферы относительная погрешность $\Delta MOR/MOR$ резко возрастает даже при незначительном изменении измеряемой МОД.

Нижние границы МОД достаточно близки между собой в пределах широкого диапазона требований к $\Delta MOR/MOR$ и превышают дистанции 8–12 м. Верхние границы МОД зависят как от требований к $\Delta MOR/MOR$, так и, особенно, от $\Delta \tau$. При снижении требований к относительной точности измерения пропускания атмосферы верхняя граница МОД и, соответственно, ширина диапазонов МОД существенно снижаются. Оценки показывают, что измерение МОД с точностью не хуже +20 % при погрешности измерения $\Delta \tau = 2,0\%$ возможно только в пределах диапазона 0,65–60 длин измерительных баз.

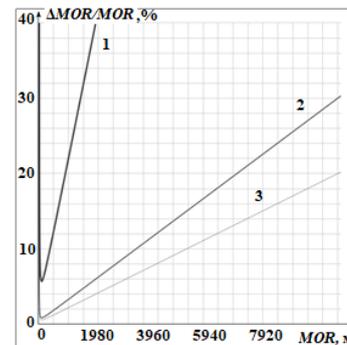


Рисунок 1 – Расчетные зависимости относительной погрешности $\Delta MOR/MOR$ от МОД для $\Delta \tau$: 2,0 % (1); 0,3 % (2) и 0,15 % (3)

Полученные уравнения (4) и (5) позволяют решить как прямую задачу расчета зависимостей погрешностей измерения МОД от $\Delta \tau$, a и MOR , так и обратную – определения $\Delta \tau$, a и границ измерения МОД при заданных требованиях к предельно допустимым погрешностям измерения МОД.

Литература

1. Ковалев, В.А. Видимость в атмосфере и ее определение / В.А. Ковалев. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 216 с.
2. Appendix 3. Meteorological support for international air navigation. Part I. Basic SARPs. Part II. Additions and additions. Twentieth edition [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fac.ch/wp-content/uploads/2020/09/ICAO-Annex-3-Meteorological-service-for-international-air-navigation.pdf>.

УДК 621.315.592

**ДИАГНОСТИКА МЕТОДОМ ЭПР СТАБИЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДИЭЛЕКТРИКА В СИСТЕМЕ Si-SiO₂ В ПРОЦЕССЕ
ЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ**

**Олешкевич А. Н.¹, Сернов С. П.², Просолович В. С.¹, Лапчук Т. М.¹, Пилипенко В. А.³,
Ковальчук Н. С.³, Лапчук М. Ю.¹**

¹Белорусский государственный университет

²Белорусский национальный технический университет

³ОАО «ИНТЕГРАЛ»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе проводились исследования пластин монокристаллического кремния с ориентацией [100], p-типа проводимости с основной легирующей примесью бора, удельным сопротивлением 12 Ом·см либо 0,005 Ом·см, с последующей обработкой согласно режиму технологической операции. Цель работы заключалась в изучении методом ЭПР влияния УФ-излучения на стабильность модифицированного ионной имплантацией поверхностного слоя кремния после процесса быстрого термического отжига. Облучение УФ излучением исследуемых образцов показало, что их сопротивление в микроволновом диапазоне измерений и резонансная частота возрастают, а при последующем облучении структур и регистрации спектров ЭПР наблюдается стабилизация резонансной частоты.

Ключевые слова: электронный парамагнитный резонанс, высокотемпературный отжиг, имплантация ионов, окисления кремния, быстрые термообработки, УФ-облучение

**EPR DIAGNOSTICS OF THE STABILITY OF ELECTROPHYSICAL PARAMETERS
OF A MULTIFUNCTIONAL DIELECTRIC IN THE Si-SiO₂ SYSTEM DURING ITS
TECHNOLOGICAL MODIFICATION**

**Oleshkevich A.¹, Sernov S.², Prosolovich V.¹, Lapchuk T.¹, Pilipenko V.³,
Kovalchuk N.³, Lapchuk M.¹**

¹Belarusian State University

²Belarusian National Technical University

³JSC «INTEGRAL»

Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The work was carried out to study single-crystal silicon wafers with the orientation [100], p-type conductivity with the main dopant of boron, specific resistance of 12 Ohm·cm or 0.005 Ohm·cm, with subsequent processing according to the mode of the technological operation. The aim of the work was to study the effect of UV-radiation on the stability of the surface layer of silicon modified by ion implantation after the process of rapid thermal annealing using the EPR method. Irradiation of the studied samples with UV-radiation showed that their resistance in the microwave measurement range and resonant frequency increase, and with subsequent irradiation of the structures and recording of the EPR spectra, stabilization of the resonant frequency is observed.

Key words: electron paramagnetic resonance, high-temperature annealing, ion implantation, silicon oxidation, rapid heat treatments, UV-irradiation

*Адрес для переписки: Сернов С. П., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ssernov@bntu.by*

Срок службы МОП транзисторов во многом зависит от стабильности, а значит надежности параметров подзатворных оксидных слоев. Возникновение в них пробоя вызвано процессом образования проводящих каналов в подзатворном оксиде в результате влияния эффектов нейтральных и заряженных дефектов [1]. Одним из основных видов отказа МОП транзисторов является именно пробой подзатворного (обычно SiO₂) диэлектрика, на его долю приходится около 50 % брака.

Цель работы – изучение стабильности модифицированного ионной имплантацией и быстрым термическим отжигом поверхностного слоя кремния после облучения УФ-излучением.

Методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) исследованы образцы монокри-

сталлического кремния с ориентацией [100], p-типа проводимости с основной легирующей примесью бора, удельным сопротивлением 12 Ом·см либо 0,005 Ом·см. Измерения ЭПР проводились с применением спектрометра «RadioPAN» SE/X-2543/ Изменение добротности резонатора оценивалось по амплитуде линии ЭПР эталона рубина, который закреплен на торцевой стенке резонатора. Во время измерений плоскость образца была перпендикулярна направлению внешнего поляризующего магнитного поля.

Для улучшения эксплуатационных параметров и надежности МОП- транзисторов проводилась соответствующая модификация подзатворных оксидных слоев с использованием азотирования, БТО и термического отжига при высоких

температурах [2]. Стабильность параметров модифицированных структур проверялась с использованием УФ-излучения, которым облучались образцы, и контролировалась в процессе многократной записи спектров ЭПР до и после их облучения. Энергия кванта УФ-излучения достаточна для разрыва химических связей или десорбции адсорбированных частиц. Процессы, происходящие в подзатворном оксидном слое и влияющие на парамагнетизм исследуемых образцов во время регистрации спектров ЭПР, контролировались по изменению двух не зависящих друг от друга параметров: 1) амплитуды эталонного образца рубина, закрепленного на стенке резонатора и 2) регистрируемой с помощью частотомера ЯЗЧ – 54 частоты клистроны.

Из рисунка 1 видно, что амплитуда сигнала ЭПР эталонного образца, как и резонансная частота, увеличились после облучения УФ-излучением, что является следствием роста сопротивления исследованных структур после воздействия на них УФ-излучения. Похожая зависимость наблюдается для всех облученных УФ-излучением образцов.

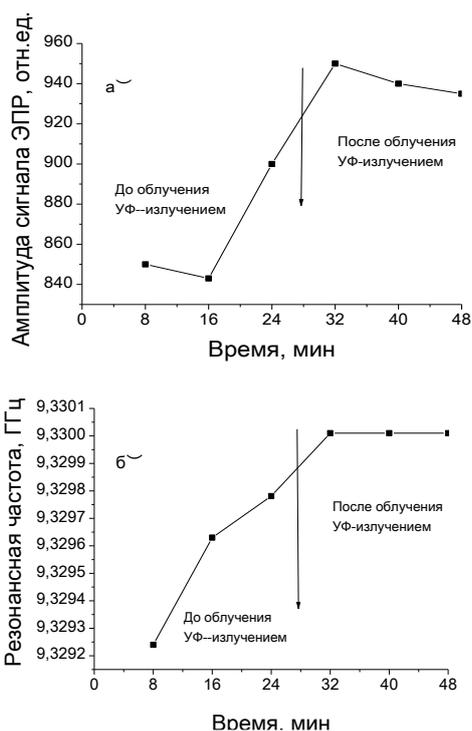


Рисунок 1 – Кинетика изменения амплитуды (а) и резонансной частоты (б) сигнала ЭПР эталонного образца при регистрации спектров ЭПР в образце кремния с удельным сопротивлением 0,005 Ом·см до и после его облучения УФ-излучением (образец имплантирован ионами азота с энергией 40 кэВ и дозой $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в планарную сторону и отожжен в режиме БТО при $T = 1050 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 15 с)

Увеличение сопротивления образца после поглощения УФ излучения объясняется захватом атомов кислорода на не скомпенсированные химические связи внутри окисного слоя. При последующих измерениях облученных УФ-излучением образцов их сопротивление стабилизируется и на графиках наблюдается насыщение, как частоты, так и амплитуды сигнала ЭПР эталонного образца.

Облучение УФ-излучением образцов исходного кремния и окисленного мало влияют на относительное изменение амплитуды сигнала ЭПР эталонного образца и резонансной частоты. Поэтому можно сделать вывод, что все процессы возбуждения и релаксации после УФ-воздействия на структуры происходят в модифицированных подповерхностных слоях на границах раздела Si – SiO₂, куда обычно стекаются все несовершенства структуры кристалла.

На рисунке 2 показана зависимость изменения частоты резонатора при вращении в нем модифицированного (1) и исходного (2) образцов кремния с удельным сопротивлением 0,005 Ом·см.

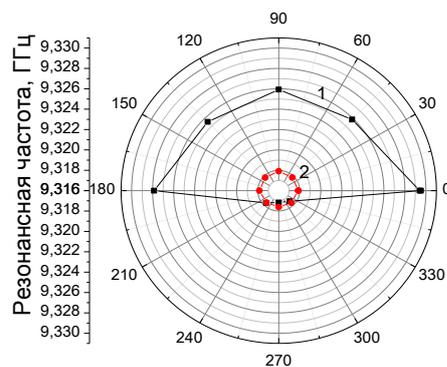


Рисунок 2 – Зависимость изменения частоты резонатора при вращении в нем относительно поляризирующего магнитного поля образцов модифицированного (1) и исходного (2) кремния с удельным сопротивлением 0,005 Ом·см

Наблюдаемая анизотропия резонансной частоты при вращении образца относительно направления поляризирующего магнитного поля есть следствие того, что эффективная поверхностная плотность заряда сосредоточена на границе раздела Si–SiO₂, где и происходят все приведенные выше эффекты.

Литература

1. Borisenko, V. E. Rapid Thermal Processing of Semiconductors / V. E. Borisenko, P. J. Hesketh // New York: Springer Science & Business Media, 1997.
2. Pilipenko, V. A. Thermal oxidation model of silicon during rapid heat treatment / V. A. Pilipenko // Vestnik BGU. Seriya 1, Fizika. Matematika. Informatika. – 2006. – № 2. – С. 35–39.

УДК 681.785.64:535.317

**АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ
НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Панько В. В.¹, Волюнец О. А.², Соколовский С. С.¹

¹*Белорусский национальный технический университет*

²*Белорусский государственный институт метрологии*

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В докладе дан анализ современной эталонной базы Республики Беларусь в области измерений напряженности магнитного поля в низкочастотном диапазоне, выделены факторы, ограничивающие функциональные возможности существующего национального эталона единицы напряженности магнитного поля и определены основные пути его совершенствования

Ключевые слова: магнитное поле, напряженность, воспроизведение единицы, модернизация эталона.

**ANALYSIS OF THE CURRENT STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF THE SYSTEM
OF METROLOGICAL TRACEABILITY IN THE FIELD OF MAGNETIC FIELD STRENGTH
MEASUREMENTS**

Panko V.¹, Volynets O.², Sokolovsky S.¹

¹*Belarusian National Technical University*

²*Belarusian State Institute of Metrology*

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The report analyzes the modern reference base of the Republic of Belarus in the field of magnetic field strength measurements in the low-frequency range, identifies the factors limiting the functionality of the existing national standard of magnetic field strength unit and determines the main ways of its improvement.

Key words: Magnetic field, strength, unit reproduction, standard modernization.

Адрес для переписки: Панько В. В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь

e-mail: pankovladavl@gmail.com

Повсеместное использование электромагнитной энергии в разнообразных областях человеческой деятельности привело к тому, что к собственному электрическому и магнитному полю Земли, атмосферному электричеству, радиоизлучению Солнца добавилось электромагнитное поле искусственного происхождения. Источники такого поля, к которым относятся воздушные линии электропередач высокого и сверхвысокого напряжения, технические средства радиовещания, телевидения, радиорелейной и спутниковой связи, радиолокационные и навигационные системы, маяки, средства мобильной связи, бытовые электроприборы существенно повлияли на естественный электромагнитный фон.

Таким образом, необходимость измерения параметров электромагнитных полей возникает практически во всех случаях использования электромагнитной энергии при решении трех следующих взаимосвязанных задач:

- обеспечение функционирования информационно - телекоммуникационных систем и технологий;
- обеспечение электромагнитной совместимости технических средств, использующих электромагнитную энергию;
- обеспечение электромагнитной безопасности окружающей среды для человека.

Всемирной организацией здравоохранения электромагнитные поля признаны самым распро-

страненным неблагоприятным фактором окружающей среды. В связи с тем, что значительные уровни электромагнитного излучения негативно влияют на здоровье человека, разработаны соответствующие технические нормативные правовые акты, в которых регламентированы биологически опасные уровни электромагнитных полей, влияющие на операторов радиотехнических установок, а также санитарные правила и нормы для защиты населения от негативного воздействия электромагнитных полей [1].

Нормирование таких полей осуществляется отдельно по напряженности электрического поля и напряженности магнитного поля или индукции магнитного поля. Из всего вышесказанного вытекает важность обеспечения метрологической прослеживаемости в области измерений напряженности магнитного поля, что должно быть основано на использовании Национального эталона единицы данной величины, удовлетворяющего требованиям практики.

Национальные эталоны единиц величин создаются для воспроизведения, хранения и передачи единиц величин и обеспечения метрологической прослеживаемости результатов измерений до единиц величин Международной системы единиц. Для контроля параметров электромагнитных полей применяются различные средства измерений, которые требуют проведения работ по метрологической оценке.

В 2020 году в рамках программы «Эталон Беларуси» был введен в эксплуатацию Национальный эталон единицы напряженности магнитного поля НЭ РБ 59-20. Эталон обеспечивает потребность метрологической оценки средств измерений напряженности магнитного поля, напряженности электромагнитного поля, в том числе измерительных антенн. Метрологические характеристики НЭ РБ 59-20:

- рабочий диапазон частот от 5 Гц до 400 кГц;
- динамический диапазон напряженности магнитного поля от 4 до 8000 мА/м;
- оценка случайной погрешности воспроизведения напряженности магнитного поля от 0,04 % до 0,08 %;
- оценка неисключенной систематической погрешности воспроизведения единицы напряженности магнитного поля от 4,3 % до 4,8 % (в зависимости от диапазона частот воспроизводимого магнитного поля) при $P = 0,95$.

Внешний вид Национального эталона единицы напряженности магнитного поля

НЭ РБ 59-20 представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид национального эталона единицы напряженности магнитного поля НЭ РБ 59-20

В состав эталона входят следующие основные блоки и модули:

- полеобразующая система на основе колец Гельмгольца (излучающий блок);
- блок управляемого генератора тока с измерителем (блок генерации и измерительный блок);
- измеритель параметров магнитного поля (компаратор магнитного поля);
- персональный компьютер с установленным специализированным программным обеспечением.

Принцип действия эталона основан на возбуждении однородного магнитного поля в пространстве между катушками полеобразующей системы на основе колец Гельмгольца, входящей в состав излучающего блока. Величина напряженности воспроизводимого оборудованием магнитного поля определяется током через катушки колец Гельмгольца, который создает блок генерации [2].

При воспроизведении напряженности магнитного поля до 0,5 А/м существенное влияние на

воспроизводимое опорное значение напряженности оказывает уровень внешнего магнитного поля, что ведет к увеличению неисключенной систематической погрешности. Для снижения воздействия внешних магнитных полей на полеобразующую систему необходимо магнитное экранирование. Известно, что для низкочастотных магнитных полей, рекомендуется применение специального экрана, изготовленного из материалов с высокой магнитной проницаемостью. На практике определено, что максимальный экранирующий эффект достигают многослойной структурой стен экрана из аморфных сплавов.

В Республике Беларусь существует большой парк средств измерений с диапазоном измерения напряженности магнитного поля на промышленной частоте, превышающим измерительные возможности существующего национального эталона. В то же время на законодательном уровне вводятся обязательные требования по сертификации продукции и аттестации рабочих мест на уровень электромагнитных полей. Предприятиями промышленности, здравоохранения, связи и информатизации, приобретаются приборы для измерения низкочастотных электромагнитных полей, ежегодная поверка которых проводится за рубежом, поскольку в силу ограниченных функциональных возможностей выполнить это на базе существующего национального эталона не представляется возможным. Предприятия несут финансовые потери, связанные с временем нахождения средств измерений в поверке, транспортировкой средств измерений за рубеж. Предлагается следующий выход из этой ситуации.

Для расширения динамического диапазона воспроизведения напряженности магнитного поля на промышленной частоте необходима полеобразующая система, состоящая из двух пар взаимно ортогональных колец Гельмгольца. Принцип действия такой системы основан на возбуждении при помощи управляемого генератора токов однородного магнитного поля во внутреннем пространстве двух пар ортогонально установленных колец Гельмгольца, имеющих общий центр. Векторы напряженности магнитного поля в кольцах Гельмгольца перпендикулярны их плоскостям и сдвинуты по фазе на 90 градусов относительно друг друга, что позволяет получать однородное эллиптически поляризованное магнитное поле с необходимыми напряженностью и коэффициентом эллиптичности, определяемыми величинами токов, протекающих в кольцах Гельмгольца.

Литература

1. Электромагнитное загрязнение [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://emc-e.ru/>.
2. Страхов, А. Ф. Автоматизированные антенные измерения / А. Ф. Страхов. – М. : Радио и связь, 1985. – 136 с.

УДК 351.824

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ И НАДЗОРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА РЫНКАХ

Рутковская Е. Н., Давыдова Е. А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной работе рассматриваются ключевые направления совершенствования контрольной и надзорной деятельности на рынках. Основное внимание уделяется переходу от карательных мер к профилактическим, что включает разъяснительную работу и обучение субъектов рынка. Также обсуждается оптимизация процедур проверок через внедрение риск-ориентированного подхода и сокращения внеплановых проверок. Важным аспектом является использование современных технологий для повышения эффективности и прозрачности надзорной деятельности. Кроме того, подчеркивается необходимость регулярного повышения квалификации сотрудников контролирующих органов для улучшения качества проверок и снижения коррупционных рисков. Эти меры направлены на создание благоприятных условий для ведения бизнеса и повышения доверия к контролирующим органам.

Ключевые слова: разъяснительная работа, профилактика, обучение, оптимизация проверок риск-ориентированный подход, эффективность.

IMPROVING CONTROL AND SUPERVISORY ACTIVITIES IN THE MARKETS

Rutkovskaya E., Davidova E.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. This paper examines key areas for improving control and supervisory activities in the markets. The main focus is on the transition from punitive measures to preventive ones, which includes explanatory work and training of market participants. Optimization of inspection procedures through the introduction of a risk-oriented approach and reduction of unscheduled inspections is also discussed. An important aspect is the use of modern technologies to improve the efficiency and transparency of supervisory activities. In addition, the need for regular advanced training of employees of regulatory authorities to improve the quality of inspections and reduce corruption risks is emphasized. These measures are aimed at creating favorable conditions for doing business and increasing trust in regulatory authorities.

Keywords: explanatory work, prevention, training, optimization of inspections, risk-oriented approach, efficiency.

Адрес для переписки: Давыдова Е. А., ул. Я. Коласа, 22, 518, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: davydovaea@bntu.by

Обеспечение качества и безопасности выпускаемой в обращение продукции в Республике Беларусь является приоритетной задачей для контролирующих органов.

В настоящее время контрольная надзорная деятельность осуществляется на основании Указа Президента Республики Беларусь от 16 октября 2009 г. № 510 «О совершенствовании контрольной (надзорной) деятельности в Республике Беларусь» [1].

В соответствии с вышеуказанным документом государственный контроль (надзор) осуществляется в формах:

- выборочных проверок;
- внеплановых проверок;
- мероприятий технического (технологического, поверочного) характера;
- мер профилактического и предупредительного характера.

Контролирующий (надзорный) орган вправе проводить проверку, если этот орган включен в перечень контролирующих (надзорных) органов, уполномоченных проводить проверки, и сфер их контрольной (надзорной) деятельности, утвержденный [1].

Вопросы, проверка которых осуществляется контролирующим (надзорным) органом, должны соответствовать компетенции этого органа.

Делегирование контролирующими (надзорными) органами своих контрольных (надзорных) полномочий иным юридическим лицам и индивидуальным предпринимателям, а также осуществление проверок, мониторингов и мероприятий технического (технологического, поверочного) характера коммерческими организациями не допускается, за исключением случая, предусмотренного частью седьмой настоящего пункта.

Особенности осуществления контроля (надзора) Управлением делами Президента Республики Беларусь и подчиненными ему организациями определяются Президентом Республики Беларусь.

Проверяемый субъект признается добросовестно исполняющим требования законодательства, пока не доказано иное.

В случае неясности или нечеткости предписаний акта законодательства решения должны приниматься в пользу проверяемого субъекта.

Проверки не должны нарушать производственно-хозяйственную деятельность проверяемых субъектов.

Контрольная (надзорная) деятельность осуществляется с использованием мер профилактического и предупредительного характера, реализуемых контролирующими (надзорными) органами во взаимодействии с субъектами, подлежащими контролю (надзору), в том числе путем: проведения мониторинга, направления рекомендаций по устранению и недопущению недостатков, выявленных в результате мониторинга; проведения разъяснительной работы о порядке соблюдения требований законодательства, применения его положений на практике; информирования субъектов (включая использование средств глобальной компьютерной сети Интернет, средств массовой информации) о типичных нарушениях, выявляемых в ходе проверок контролирующими (надзорными) органами; проведения семинаров, круглых столов и другого.

По совершенствованию контрольной и надзорной деятельности на рынках установлено:

- смещение акцента на профилактику: важным аспектом совершенствования контрольной и надзорной деятельности является переход от карательных мер к профилактическим. Это включает в себя проведение разъяснительной работы с субъектами рынка, обучение и консультирование, что способствует снижению уровня правосознания. Помогает предотвратить нарушения до их возникновения. Переход от карательных мер к профилактическим в контрольной и надзорной деятельности направлен на снижение административного давления на бизнес и повышение эффективности контроля. Он включает в себя проведение разъяснительной работы и обучение субъектов предпринимательства. Внеплановые проверки теперь назначаются только в исключительных случаях, что снижает количество проверок и уменьшает вмешательство в деятельность предприятия;

- оптимизация процедур проверок: для уменьшения административной нагрузки на бизнес необходимо сократить количество внеплановых проверок и упростить процедуры плановых проверок. Это может быть достигнуто через внедрения риск-ориентированного подхода, при котором проверки проводятся только в отношении субъектов с высоким уровнем риска. Разработка критериев для оценки рисков, использование автоматизированных систем для планирования проверок, сокращение времени на проведение проверок. Введена ответственность за грубые нарушения при проведении проверок, что способствует более справедливому и объективному подходу к

контролю. Контрольные мероприятия сосредотачиваются на областях с наибольшими рисками для безопасности граждан;

- использование современных технологий: внедрение цифровых инструментов и автоматизация процессов контроля позволяют повысить эффективность прозрачность надзорной деятельности. Это включает в себя использование электронных систем для подачи отчетности, мониторинга и анализа данных, внедрение мобильных приложений для проведения проверок. Современные технологии играют важную роль в контрольной и надзорной деятельности, значительно повышая ее эффективность и прозрачность. Внедрение информационных систем позволяет автоматизировать процессы взаимодействия между контрольно-надзорными органами и проверяемыми лицами, органами прокуратуры и другими заинтересованными лицами. Применение цифровых технологий способствует снижению административной нагрузки на бизнес и повышению прозрачности проверок;

- повышения квалификации контролирующих органов: регулярное обучение и повышение квалификации сотрудников контролирующих органов способствует улучшению качества проверок и снижению коррупционных рисков. Важно также внедрять современные методы управления и оценки эффективности работы контролеров. Организация курсов и тренингов для сотрудников, внедрение современных методов управления и оценки эффективности работы контролеров, проведение аттестаций и сертификаций;

- новые инструменты контроля: внедрение таких инструментов, как дистанционный мониторинг, контрольные закупки и документированные проверки, позволяют минимизировать прямое воздействие с бизнесом, сохраняя при этом высокую эффективность контроля;

- противодействие коррупции: цифровизация административных процедур и контрольно-надзорной деятельности помогает снизить уровень коррупции за счет своей прозрачности и автоматизации процессов.

Эти примеры помогут создать более благоприятные условия для ведения бизнеса и повысить доверие к контролирующим органам.

Литература

1. Указ Президента Республики Беларусь от 16 октября 2009 г. № 510 «О совершенствовании контрольной (надзорной) деятельности в Республике Беларусь».

УДК 681

ВЛИЯНИЕ НЕСООТВЕТСТВИЯ ПРИНЯТОЙ МОДЕЛИ РЕАЛЬНОМУ ОБЪЕКТУ ИЗМЕРЕНИЯ НА ДОСТАВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ КООРДИНАТНОГО

Селятыцкий А. А., Гомма М. А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Координатный контроль – это процесс измерения геометрических параметров реального объекта с использованием специальных измерительных машин и сравнения полученных данных с заданной моделью. Важно понимать, что координатный контроль не просто «измеряет» объект, а сравнивает его с моделью. Для получения идеалистического результата измерения учитывается огромное количество факторов влияния.

Ключевые слова: координатный контроль, модель, несоответствие, влияние, реальный объект.

THE IMPACT OF THE MISMATCH BETWEEN THE ADOPTED MODEL AND THE REAL OBJECT OF MEASUREMENT ON THE RELIABILITY OF COORDINATE CONTROL RESULTS

Seliatytski A., Homma M.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Coordinate control is the process of measuring the geometric parameters of a real object using special measuring machines and comparing the data obtained with a given model. It is important to understand that coordinate control does not just «measure» an object, but compares it with a model. To obtain an idealistic measurement result, a huge number of influence factors are taken into account.

Key words: coordinate control, model, discrepancy, influence, real object.

Адрес для переписки: Селятыцкий А. А., пр. Независимости, 168/3, г. Минск 220141, Республика Беларусь
e-mail: sefthu.by@gmail.com.

Модель, используемая в координатном контроле, создается до начала измерений и используется для сравнения с реальным объектом. Это ключевой этап, определяющий точность и достоверность результатов.

Создание модели на этапе:

– проектирования: создается САД-модель объекта, основанная на чертежах, спецификациях и требованиях к производству. Эта модель используется как эталон для сравнения с реальным объектом;

– производства: если в процессе производства возникают изменения, в модель вносят коррективы, например, изменения размеров, геометрии, формы;

– после производства: если требуется более точная модель, ее создают с помощью 3D-сканирования реального объекта, чтобы учесть все особенности его формы и геометрии.

Несоответствие принятой модели реальному объекту измерения может привести к серьезным искажениям результатов координатного контроля. Вот некоторые ключевые факторы, которые влияют на это несоответствие и его влияние на достоверность измерений:

1. Несоответствия:

– отклонение формы: несоответствие модели реальной форме объекта (например, искривления, неровности) может привести к ошибкам в измерении размеров и положения точек;

– отклонение размера: неверные размеры в модели приведут к неточным результатам измерения линейных размеров;

– отклонение положения: если модель не учитывает правильное положение объекта в пространстве, то координаты точек будут искажены;

– отклонение геометрических параметров: несоответствие модели реальным геометрическим параметрам (например, углы, радиусы, кривизна) приведет к неточным результатам измерения геометрических характеристик объекта.

2. Выбор метода координатного контроля:

– контактные методы: контактные методы измерения (например, щуповые измерительные системы) более чувствительны к отклонениям формы и размера объекта, чем бесконтактные методы;

– бесконтактные методы: бесконтактные методы (например, оптические системы, 3d-сканирование) менее чувствительны к несоответствию формы, но могут быть более чувствительны к отклонениям положения и освещения.

3. Точность модели:

– уровень детализации: более детализированная модель будет точнее отражать реальный объект, что снизит влияние несоответствия;

– качество модели: качество модели зависит от способа ее создания (например, САД-моделирование, 3d-сканирование). Более точное моделирование приведет к более точным результатам измерения.

4. Точность измерительного оборудования:

– разрешение: разрешение измерительного оборудования определяет минимальный размер,

который может быть измерен. более высокое разрешение позволяет обнаружить более мелкие отклонения от модели;

– точность: Точность измерительного оборудования определяет величину ошибки измерения. Более высокая точность снижает влияние несоответствия модели на результаты измерения.

5. Опыт оператора:

– навыки и знания: опыт и навыки оператора влияют на точность измерения и интерпретацию результатов.

Способы решения:

1. Создание точной модели: использование точных измерительных данных (создание модели на основе данных, полученных с помощью высокоточных измерительных систем); использован 3D сканирования (сканирование реального объекта для получения точной цифровой модели); Использование CAD-модели (внесение необходимых изменений в CAD-модель для максимально точного соответствия реальному объекту).

2. Учет деформаций объекта: применение методов компенсации деформаций; контроль температурных условиях (обеспечение стабильной температуры объекта и окружающей среды для минимизации деформаций); применение компенсирующих элементов (использование специальных элементов, позволяющих снизить влияние деформаций на результаты измерения).

3. Снижение технологических отклонений: повышение точности производства (использование более точных технологических процессов, материа-

лов и оборудования); введение более жестких допусков (установка более точных требований к размерам и форме объекта); контроль качества на всех этапах производства (регулярный контроль качества продукции на всех этапах производства для своевременного выявления и устранения дефектов)

4. Минимизация ошибок в процессе измерения: использование высокоточных измерительных систем: Выбор измерительных систем с необходимой точностью и разрешением; Правильная установка объекта: Правильное позиционирование объекта для максимально точного измерения; Обучение операторов.

Несоответствие принятой модели реальному объекту измерения может существенно повлиять на достоверность результатов координатного контроля. Важно учитывать все факторы, которые влияют на это несоответствие, и принять меры для минимизации его влияния. Это позволит получить более точные данные и улучшить качество производимой продукции.

Литература

1. Буров, В. А. Координатные измерения в машиностроении: учебное пособие / В. А. Буров. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 256 с.
2. Калачев, А. В. Основы метрологии, стандартизации и сертификации: учебник / А. В. Калачев. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 368 с
3. Баранов, А. И. Методы и средства координатного контроля. М.: Машиностроение, 2019.
4. Кузнецов, А. С. Проблемы и решения в области контроля качества / А. С. Кузнецов // Журнал автоматизации. – 2023.

УДК 53.087.2

АЛГОРИТМ ЭКСПЕРТНОГО ОЦЕНИВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЕСОМОСТИ СВОЙСТВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Серенков П. С., Романчак В. М., Бережных Е. В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Обоснована постановка задачи многокритериального выбора наиболее приемлемого для разработчика компонента проектируемого объекта. Представлена концепция модуля экспертной системы поддержки принятия решения, которая по запросу разработчика осуществляет поиск и дает интегральную оценку уровня предпочтительности каждого из предложенных альтернативных вариантов. В основу концепции положена классическая квалиметрическая модель. Рассмотрено решение частной задачи по критериальному оцениванию коэффициентов весомости свойств проектируемого объекта.

Ключевые слова: экспертная система, квалиметрическая модель, коэффициенты весомости свойств

ALGORITHM FOR EXPERT ASSESSMENT OF PROPERTY WEIGHT COEFFICIENTS IN DESIGNING OF COMPLEX TECHNICAL OBJECTS

Serenkov P., Romanchak V., Berazhnykh E.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The problem statement of multi-criteria selection of the most acceptable component of the designed object for the developer is substantiated. The concept of the module of the expert decision support system is presented, which, at the request of the developer, searches and provides an integral assessment of the level of preference of each of the proposed alternative options. The concept is based on the classical qualimetric model. The solution of a particular problem on the correct assessment of the weighting coefficients of the properties of the designed object is considered. Keywords: expert system, qualimetric model, weighting coefficients of properties.

Key words: expert system, qualimetric model, weighting coefficients of properties

*Адрес для переписки: Серенков П. С., ул. Я. Коласа, 22, 518, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: pavelserenkov@bntu.by*

Проектирование сложных технических объектов в современных условиях построено на модульном принципе. Т. е. проектируемое изделие рассматривается как иерархически структурированный набор взаимосвязанных компонентов, подавляющая часть которых являются готовыми изделиями, приобретаемыми на рынке. Предметом доклада выступает задача выбора на альтернативной основе наиболее приемлемого для разработчика компонента проектируемого технического объекта.

Экспертная система поддержки принятия решения по запросу разработчика выдает ряд альтернативных вариантов проектируемого компонента, например, вычислительной интегральной микросхемы. Предлагаемая в докладе концепция модуля экспертной системы нацелена на оценку степени предпочтительности предложенных альтернативных вариантов с позиций, например, надежности сложных технических объектов. Основная проблема достоверной оценки степени предпочтительности заключается в том, что к каждому элементу технического объекта разработчик предъявляет комплекс свойств, которые в совокупности определяют его выбор из предложенного множества альтернативных вариантов. При этом каждый вариант по каждому свойству может иметь различную степень выраженности (оптимальности, предпочтительности).

Для интегральной оценки степени предпочтительности каждого из предложенных альтер-

нативных вариантов проектируемого элемента рационально применить аддитивную квалиметрическую модель типа:

$$U(x_1, x_2, \dots, x_n) = k_1 \cdot x_1 + k_2 \cdot x_2 + \dots + k_n \cdot x_n, \quad (1)$$

где $U(x_1, x_2, \dots, x_n)$ - интегральная оценка степени предпочтительности проектируемого компонента, k_i - коэффициенты влияния свойств (в порядке убывания), x_i - числовые значения уровня приемлемости каждого свойства, $0 \leq x_i \leq 1$, n - количество свойств.

В докладе рассмотрено решение первой задачи - корректное экспертное оценивание коэффициентов влияния k_i .

Обоснован и предложен алгоритм оценивания k_i - коэффициентов влияния свойств.

Для оценки коэффициенты влияния будем использовать авторский метод альтернатив [1].

1 шаг. Экспертная система для типового элемента проектируемого объекта априори предлагает комплекс из n свойств (x_1, x_2, \dots, x_n) в случайном порядке и предлагает разработчику ранжировать свойства проектируемого элемента, располагая их в таблице в порядке убывания значимости для надежности объекта, присвоив им ранги V_i (свойство V_1 - наиболее значимо и свойство V_n - наименее значимо).

2 шаг. Экспертная система формирует планы A и B для опроса разработчика, включающие серию вопросов:

В какой мере свойство элемента V_i более значимо для надежности объекта космической техники, чем свойство элемента V_j ?», т. е. сравнивает каждое i -ое свойство с j -м свойством, руководствуясь 9-тибалльной шкалой Т. Саати парных сравнений и заполняет табл. 1 сравнительных оценок по шкале парных сравнений.

Таблица 1 – Сравнительные оценки свойств по шкале парных сравнений

План А: $V_i - V_n$	Ответ разработчика в баллах	План В: $V_{i+1} - V_i$	Ответ разработчика в баллах
$V_1 - V_n$	9	$V_1 - V_2$	1
$V_2 - V_n$	7	$V_2 - V_3$	1
$V_3 - V_n$	5	$V_3 - V_4$	4
...
$V_{n-1} - V_n$	3	$V_{n-1} - V_n$	0

3 шаг. Экспертная система вычисляет значения рейтингов всех свойств проектируемого элемента по данным опроса разработчика из планов А и В. С этой целью экспертная система преобразовывает оценки табл. 1 в рейтинги R_{ij} :

– для плана А рейтинги:

$$R_{ik} = V_i - V_k, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad i \neq k,$$

$$R_{kk} = V_k - V_k = 0;$$

– для плана В рейтинги:

$$R_{i, i+1} = V_i - V_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, n - 1,$$

$$R_{n, n+1} = 0.$$

4 шаг. Экспертная система выполняет следующее преобразование значений рейтингов $R_{i, j}$ для планов А и В, приводя их к единому сравнимому виду $R_{i, n}$.

– для плана А преобразованные рейтинги:

$$R_{i, n} = R_{i, k} - R_{n, k}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

– для плана В преобразованные рейтинги:

$$R_{i, n} = R_{i, i+1} + R_{i+1, n}, \quad i = n - 1, n - 2, \dots, 1$$

$$R_{n, n} = 0$$

5 шаг. Экспертная система выполняет нормирование рейтингов $R_{i, n}$ отдельно для планов А и В по формуле:

$$R_{i, n} = R_{i, n} / R_{1, n}, \quad i = n - 1, n - 2, \dots, 1$$

и формирует таблицу 2.

6 шаг. Экспертная система выполняет проверку корректности полученных оценок рейтингов $R_{i, n}$ по критерию Пирсона и рассчитывает коэффициент корреляции $R(X, Y)$ нормированных значений преобразованных рейтингов $R_{i, n}$ по значениям табл. 3 (планы А и В).

$$R(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - a_x)(y_i - a_y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - a_x)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - a_y)^2}}$$

где x_i – нормированные значения преобразованных рейтингов $R_{i, n}$ из плана А, y_i – нормированные значения преобразованных рейтингов $R_{i, n}$ из

плана В, a_x – среднее арифметическое рейтингов $R_{i, n}$ из плана А, a_y – среднее арифметическое рейтингов $R_{i, n}$ из плана В, n – число свойств, характеризующих проектируемый компонент.

Таблица 2 – Нормированные значения преобразованных рейтингов $R_{i, n}$ свойств x_i проектируемого элемента объекта

План А, $R_{i, n}^A$	Обработка ответов	План В, $R_{i, n}^B$	Обработка ответов	Среднее из планов А и В $R_{i, n}^{AB}$
$R_{1, 13}$	1,000	$R_{1, 13}$	1,000	1,000
$R_{2, 13}$	1,000	$R_{2, 13}$	0,909	0,955
$R_{3, 13}$	0,889	$R_{3, 13}$	0,818	0,854
$R_{4, 13}$	0,889	$R_{4, 13}$	0,727	0,808
$R_{5, 13}$	0,778	$R_{5, 13}$	0,636	0,707
$R_{6, 13}$	0,778	$R_{6, 13}$	0,636	0,707
$R_{7, 13}$	0,222	$R_{7, 13}$	0,364	0,293
$R_{8, 13}$	0,222	$R_{8, 13}$	0,364	0,293
$R_{9, 13}$	0,111	$R_{9, 13}$	0,273	0,192
$R_{10, 13}$	0,111	$R_{10, 13}$	0,273	0,192
$R_{11, 13}$	0,000	$R_{11, 13}$	0,182	0,091
$R_{12, 13}$	0,000	$R_{12, 13}$	0,091	0,045
$R_{13, 13}$	0,000	$R_{13, 13}$	0,000	0,000

Если коэффициент корреляции $R(X, Y) \geq r_k$, где r_k – критическое значение коэффициента Пирсона для заданного уровня доверительной вероятности, т. е. значим, экспертная система вычисляет среднее значение рейтингов $R_{i, n}^{AB}$ для планов А и В: $R_{i, n}^{AB} = (R_{i, n}^A + R_{i, n}^B) / 2$.

Если коэффициент корреляции $R(X, Y) < r_k$, т. е. незначим, экспертная система предлагает разработчику повторить процедуру опроса.

В дальнейшем экспертная система будет понимать $R_{i, n}^{AB}$, как $R_{i, n}$.

7 шаг. Экспертная система рассчитывает собственно коэффициенты влияния свойств, характеризующих проектируемый элемент объекта космической техники, $k_i, i = 1 \dots n$.

Параметры для расчета по умолчанию:

– $\alpha = 0,05$ (5%) – относительный уровень значимости наименее значимого свойства (последнего в ряду ранжированных свойств),

– $M = 10$ (максимальное значение ранговой 10-ти балльной шкалы).

Экспертная система рассчитывает масштабный коэффициент λ :

$$\lambda = M / (n \cdot \alpha + R_{1, n} + R_{2, n} + \dots + R_{n-1, n})$$

Коэффициенты влияния $k_i, i = 1 \dots n$ определяются системой по формуле: $k_i = \lambda (R_{i, n} + \alpha)$

Литература

1. Метод альтернатив как эффективный механизм повышения достоверности экспертных оценок / П. С. Серенков [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2011. – № 6. – С. 31–39.

УДК 53.087.2

**МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ СТЕПЕНИ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОСТИ СВОЙСТВ
КОМПОНЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Серенков П. С., Романчак В. М., Бережных Е. В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Приведено решение задачи повышения степени доверия к экспертным оценкам, которые делает разработчик компонентов технических объектов в процессе коммуникации с экспертной системой. Решение задачи приведено для условий многокритериального выбора. Методика оценки учитывает возможность задания свойств проектируемого компонента значениями в дискретном или непрерывном виде, в виде одного значения или диапазона значений.

Ключевые слова: экспертная система, свойство компонента, степень предпочтительности

**THE ASSESSING METHOD OF THE PROPERTIES PREFERENCE DEGREE OF TECHNICAL
OBJECTS COMPONENTS IN THE DESIGN PROCESS**

Serenkov P., Romanchak V., Berazhnykh E.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The solution to the problem of increasing the degree of trust in expert assessments made by the developer of technical object components in the process of communication with the expert system is presented. The solution to the problem is given for the conditions of multi-criteria selection. The evaluation method takes into account the possibility of specifying the properties of the designed component by values in discrete or continuous form, as a single value or a range of values.

Key words: expert system, component property, degree of preference

*Адрес для переписки: Серенков П. С., ул. Я. Коласа, 22, 518, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: pavelserenkov@bntu.by*

Обоснована концепция модуля экспертной системы компьютерной поддержки проектирования компонентов сложных технических объектов. Модуль предназначен для оценки степени предпочтительности предложенных альтернативных вариантов компонентов с позиций, например, надежности объектов.

Основная проблема подобного рода экспертных систем – невысокая степень доверия к экспертным оценкам, которые делает разработчик компонента в процессе коммуникации с экспертной системой. Проблема усугубляется тем, что решается задача многокритериального выбора, т. е. экспертная система по запросу разработчика осуществляет поиск и дает интегральную оценку уровня предпочтительности каждого из предложенных альтернативных вариантов проектируемого компонента по комплексу свойств с различной степенью предпочтительности.

В основу концепции модуля экспертной системы положена классическая квалиметрическая модель интегральной оценки уровня предпочтительности альтернативных вариантов проектируемого компонента. Для того, чтобы получаемые интегральные оценки были корректными, для оценивания составляющих квалиметрической модели обоснован и адаптирован авторский метод альтернатив. Преимущество метода заключается в том, что составляющие модели – коэффициенты влияния свойств и значения уровней приемлемо-

сти каждого свойства – оцениваются в шкале интервалов. Это позволяет корректно, с достаточным уровнем достоверности применять классическую модель для расчета интегральной оценки уровня предпочтительности альтернативных вариантов проектируемого компонента

Свойство проектируемого компонента объекта x_i может быть задано разработчиком значениями в дискретном или непрерывном виде.

Пример значений в дискретном виде:

– качественная шкала: цвет, производитель, форма;

– количественная шкала: категория качества, класс точности, разрядность.

Пример значений в непрерывном виде: числовое значение свойства, заданное в метрических шкалах: 5 В, 20 °С, 700 МПа, 25 Дж и т. д.

Свойство x_i компонента задано дискретно.

Для задания требований к уровню приемлемости значения свойства проектируемого компонента x_i обоснована 11-балльная шкала:

$R = 0$ – минимальная предпочтительность (рейтинг) разработчика в отношении значения свойства x_i .

$R = 10$ – максимальная предпочтительность (рейтинг) разработчика в отношении значения свойства x_i .

Разработчик задает в отношении свойства x_i требования либо в качественном, либо в количественном виде. Например, в виде перечня

производителей компонента, в виде диапазона классов точности и т. д.

Метод оценивания каждого из заданных требований в отношении свойства x_i – ранговый, непосредственной оценки. Эксперт должен ранжировать по 11 – балльной шкале все приемлемые варианты заданных требований в отношении свойства x_i . Экспертная система осуществляет поиск компонентов, удовлетворяющих в том числе и требованиям по свойству x_i , и присваивает каждому найденному j -му альтернативному компоненту рейтинг $R_{i,j}$.

Далее экспертная система нормирует значения рейтингов $R_{i,j}$, формируя значения уровня предпочтительности свойства x_i каждого найденного альтернативного компонента для последующего расчета его интегральной оценки степени предпочтительности $U(x_1, x_2, \dots, x_n)$ для решения задачи выбора наилучшего. Нормированное значение уровня предпочтительности свойства $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ для j альтернативного компонента: $x_{i,j} = R_{i,j} / 10$.

Свойство x_i элемента задано в непрерывно.

Данная задача является многовариантной в части способа формирования запроса, поэтому экспертная система должна априори определить пути – алгоритмы для каждого из способов. Для этого запрос разработчика в отношении уровня предпочтительности свойства x_i проектируемого компонента должен быть предварительно закодирован в зависимости от варианта формирования требований к свойству X (таблица 1).

Таблица 1 – Варианты формирования требований к свойству X , заданному в непрерывном виде

Свойство X	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Способ задания	Одно значение, x	Одно значение, x	Интервал $x \in [a, b]$	Интервал $x \in [a, b]$
Целевое значение, Z	Z задано	Z не задано	Z не задано	Z не задано
Условие приемлемости	X внутри интервала $[a, b]$, $x \geq a$, $x \leq b$	X внутри интервала $[a, b]$, $x \geq a$, $x \leq b$	X внутри интервала $[a, b]$, $x \geq a$, $x \leq b$	X вне интервала $[a, b]$, $x \leq a$, $x \geq b$
Рейтинг альтернативы, $R_{i,j}$	$R_{i,j} = f[x, a, b]$	$R_{i,j} = 10$	$R_{i,j} = 10$	$R_{i,j} = 10$

Экспертная система по коду определяет ситуацию (вариант задания требований к поиску), предлагает разработчику соответствующий интерфейс запроса на поиск компонента проектируемого объекта по свойству x_i и осуществляет поиск приемлемых вариантов в соответствии

с предъявленными требованиями. После того, как найдено множество j -ых альтернативных вариантов компонентов, удовлетворяющих сформулированным требованиям, экспертная система производит оценку рейтингов альтернатив (таблица 2).

Таблица 2 – Определение рейтинга альтернативных предложений

	Ситуация (вариант)			
	1	2	3	4
Рейтинг ($R_{i,j}$) альтернативного предложения компонента	По формуле $R_{i,j} = f(Z, a, b, m, M)$	$R_{i,j} = 10$	$R_{i,j} = 10$	$R_{i,j} = 10$

Как следует из таблицы 2 в ситуациях 2, 3, 4 значение рейтинга j -ого предложения $R_{i,j} = 10$. Для вычисления рейтинга для ситуации 1 экспертная система задействует специальную подпрограмму расчета, основанного на формировании функции полезности [1, 2]. Далее экспертная система нормирует значения рейтинга, формируя значения степени предпочтительности свойства x_i для каждого найденного альтернативного компонента для последующего расчета его интегральной оценки уровня предпочтительности $U(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Нормированное значение уровня предпочтительности свойства $x_{i,j}$ для j -ого альтернативного компонента: $x_{i,j} = R_{i,j} / 10$.

Экспертная системы последовательно в диалоге с разработчиком формирует запросы по каждому свойству x_i проектируемого компонента. После того, как требования ко всем свойствам сформулированы, экспертная система осуществляет поиск альтернативных вариантов проектируемого компонента, которые удовлетворяют всем требованиям x_i , заданным как в дискретном, так и непрерывном виде. Экспертная система оценивает уровень предпочтения по каждому свойству x_i , $i = 1 \dots n$ для каждого j -ого альтернативного компонента. После чего экспертная система рассчитывает интегральный уровень предпочтительности для каждого j -ого альтернативного компонента по формуле (1). Далее разработчик производит выбор того или иного варианта компонента проектируемого объекта, руководствуясь расчетом и другими соображениями.

Литература

1. Метод альтернатив как эффективный механизм повышения достоверности экспертных оценок / П. С. Серенков [и др.] // Метрология и приборостроение. – Минск, 2011. – № 6. – С. 31–39.
2. Применение теории полезности для формирования ядра экспертной системы / П. С. Серенков [и др.] // Методы менеджмента качества. – 2013. – № 7. – С. 24–29.

УДК 621.3.026; 621.3.08; 621.389

НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ СЧЕТЧИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ЛЮБОЙ КОНСТРУКЦИИ

Серенков П. С., Романчак В. М., Богуславский С. И.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Предложенный в РМГ 74-2004 структурированный классический метод сбора данных не всегда эффективен для анализа статистических данных. Предложено использовать непараметрическую аппроксимацию, которая позволяет оценивать функцию связи, на основании информации, получаемой из различных источников. Для этого предлагается применять суперпозицию вейвлетов, представленных в виде дельта-функций.

Ключевые слова: непараметрическая аппроксимация, электрические счетчики, вейвлеты

NONPARAMETRIC ASSESSMENT OF METROLOGICAL RELIABILITY OF ELECTRICITY METERS OF ANY DESIGN

Serenkov P., Romanchak V., Boguslavsky S.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The structured classical method of data collection proposed in RMG 74-2004 is not always effective for analysing statistical data. It is proposed to use non-parametric approximation, which allows estimating the link function, based on information obtained from different sources. For this purpose, it is proposed to use a superposition of wavelets represented as delta functions.

Key words: nonparametric approximation, electric counters, wavelets

*Адрес для переписки: Серенков П. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: pavelserenkov@bntu.by*

Интеллектуальные счетчики электрической энергии переменного тока, используемые в трехфазных и однофазных сетях переменного напряжения объектов электроснабжения получают все большее распространение. Основная причина – возможность построения на их основе интеллектуальных систем учета электроэнергии (АСКУЭ-быт, АСКУЭ-промышленных предприятий и АСКУЭ объектов генерации и электросетевых объектов), которые используются для взаиморасчетов за электроэнергию между поставщиками и потребителями, для оптимизации энергопотребления и для предотвращения хищений электроэнергии.

Одним из ключевых критериев функционирования интеллектуальных счетчиков электрической энергии переменного тока, применяемых на энергообъектах любой конструктивной реализации, является метрологическая надежность, как способность сохранять метрологическую исправность.

Интеллектуальные счетчики электрической энергии входят в Перечень категорий средств измерений, которые подлежат обязательной государственной поверке с установленной в нем периодичностью, определенном постановлением Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь от 20 апреля 2021 г. № 39 «О перечне категорий средств измерений» (далее Перечень) установлены предельные значения для Республики Беларусь. Поверка счетчиков любой конструкции дает официальное подтверждение пригодности приборов учета к дальнейшей эксплуатации.

Следует отметить, что интеллектуальные счетчики для измерения электрической энергии переменного тока, применяемые в однофазных и трехфазных системах, представляют собой высокотехнологичные электронные устройства, качество (надежность) которых ожидаемо выше, чем у обычных счетчиков электрической энергии.

Очевидно, что производителей интеллектуальных счетчиков (на примере счетчиков Гран-Электро СС-101 и Гран-Электро СС-301), уверенных в высокой надежности своей продукции, не устраивает фиксированное значение межповерочного интервала, определенное для средств измерений данной категории в Перечне. Определенные в Перечне значения межповерочного интервала по мнению производителей занижены, что делает белорусских производителей неконкурентоспособными по сравнению, например, с российскими производителями подобной продукции.

Для обоснования изменения процедуры назначения межповерочных интервалов счетчиков производитель реализует проект по комплексному исследованию поведения метрологических характеристик (МХ) интеллектуальных счетчиков во времени.

Проект основан на рекомендациях РМГ 74-2004 «Государственная система обеспечения единства измерений. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений» (далее – Руководство). В Руководстве предложены методы обработки изме-

рительной информации, направленные на получение зависимостей значений MX от времени.

Первоначальное значение межповерочного интервала, определяемое разработчиком средства измерений, вносится в эксплуатационную документацию и утверждается при испытаниях на утверждение типа. В процессе эксплуатации это значение корректируется организациями, проводящими поверку/калибровку, с учетом их результатов.

Определение межповерочного интервала основывается на моделировании зависимости показателей точности или метрологической надежности средства измерений от времени/наработки с момента последней поверки/калибровки.

Методы, описанные в Руководстве, базируются на моделировании процессов дрейфа MX СИ с использованием обобщенного нормального распределения или нормального распределения.

В качестве метрологических критериев назначения/корректировки межповерочного интервала принимаются следующие показатели метрологической надежности [1]:

- вероятность метрологической исправности интеллектуальных счетчиков любой конструктивной реализации в заданный момент времени [$t-R_{mi}(t)$], показывает вероятность того, что в заданный момент времени счетчик окажется метрологически исправным. Базовым критерием является значение, находящееся на интервале 0,95–0,99;

- коэффициент метрологической исправности [$K_{mi}(t)$], показывает среднюю долю времени на интервале $(0, t)$, в течении которого счетчик одного типа находится в метрологически исправном состоянии. Базовым критерием является значение, находящееся на интервале 0,975–0,995.

Основная цель проекта по комплексному исследованию поведения MX интеллектуальных счетчиков заключается в решении трех ключевых задач:

- определение реальной надежности счетчиков определенной конструкции и выявление различий между показателями, установленными проектной и эксплуатационной документацией, с одной стороны, и фактическими данными, с другой;

- анализ статистических характеристик метрологических отказов счетчиков в процессе их эксплуатации.

- изучение условий, закономерностей и тенденций, связанных с метрологической надежностью счетчиков, с целью прогнозирования снижения качества во времени.

Для этих целей производитель в соответствии с пунктом В.1.4 РМГ 74-2004 должен организовать подконтрольную эксплуатацию партии се-

рийно выпускаемых счетчиков для сбора информации о их метрологической надежности и представить материалы, относящиеся к корректировке межповерочного интервала, в организацию государственной метрологической службы.

Данное требование предполагает значительные затраты на организацию эксперимента по сбору данных. Но при этом гарантирует корректность получаемых результатов (прогнозируемого межповерочного интервала).

В докладе обосновывается факт о том, что приведенный в РМГ 74-2004 структурированный классический подход к организации сбора данных, в ряде случаев не может служить основой механизма сбора и анализа данных о качестве в силу своей неэффективности.

Предложен альтернативный подход, основанный на использовании протоколов поверки всего массива эксплуатируемых счетчиков. Эти записи составляют неупорядоченный массив фактов для обработки и дальнейшего анализа. Проблема в том, что обычными статистическими методами получить полезную информацию из такого массива пассивно собранных фактов невозможно.

В докладе обоснована возможность аппроксимации с заранее заданной точностью априори неизвестной оцениваемой функции связи фиксируемых в процессе очередных проверок значений MX всего массива эксплуатируемых счетчиков с критериями [$t-R_{mi}(t)$] и [$K_{mi}(t)$] с помощью суперпозиции вейвлетов в виде дельтаобразных функций [2].

Теоретически доказано, что характеристика степени доверия к результатам моделирования может быть представлена как расширенная неопределенность результата аппроксимации при заданном уровне доверия. В таком виде показатель степени доверия является комплексным, т. е. характеризует в комплексе «качество» модели аппроксимации, неточность воспроизведения показателя результативности и факторов, недостаточность точек факторного пространства, «качество» заполнения факторного пространства регистрируемыми данными [2].

Литература

1. Фридман А. Э. Основы метрологии: современный курс. – Санкт-Петербург: Професионал, 2008. – 279 с.
2. Серенков, П. С. Концепция механизма сбора и анализа данных в условиях реального функционирования системы менеджмента качества промышленного предприятия / П. С. Серенков, В. М. Романчук, В. Л. Соломахо // Весці НАН Беларусі. Сер. Фіз.-тэхн. навук. – 2007. – № 1. – С. 55–60.

УДК 006.9:004.415.2(047)(476)

**КОМПЛЕКС ДЛЯ СЕРТИФИКАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ
К МЕХАНИЧЕСКОМУ ИЗНОСУ ПЛАСТМАССОВЫХ РАССЕЙВАТЕЛЕЙ УСТРОЙСТВ
И СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ ДОРОГИ МЕХАНИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

**Сернов С. П.¹, Балохонов Д. В.¹, Колонтаева Т. В.¹,
Тадэуш Н. Н.¹, Федорцев Р. В.¹, Коничева Л. М.²**

¹Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

²ОАО «РУДЕНСК»

Руденск, Республика Беларусь,

Аннотация. Для испытания устройств освещения дороги на стойкость к механическому износу при сертификации на соответствие Правилам ООН № 149 предлагается конструкция испытательного комплекса, которая позволяет проводить указанные испытания в полном соответствии с Правилами ООН № 149, при этом учитывая противоречия, связанные с неточностями формулировки методики испытания в данных Правилах и отсутствием четкого понимания механизма гидроабразивного износа при эксплуатации устройств освещения дороги механических транспортных средств.

Ключевые слова: устройства и системы освещения дороги, сертификация, испытания на износ.

**A TEST COMPLEX FOR MECHANICAL VEHICLES ROAD ILLUMINATION DEVICES AND
SYSTEMS MECHANICAL DETERIORATION CERTIFICATION TESTING**

**Sernov S.¹, Balokhonov D.¹, Kolontaeva T.¹, Tadeush N.¹, Fiodartsau R.¹
Konicheva L.²**

¹Belarusian national technical university

Minsk, Republic of Belarus

²JSC Rudensk

Rudensk, Republic of Belarus

Abstract. To conduct certification tests in the field of mechanical deterioration according to UN Regulations № 149 a testing complex is proposed. The test complex allows to conduct said tests in full accordance with UN Regulations № 149 while taking into account most contradictions in testing methods of said Regulations and the lack of full understanding of hydro abrasive wear mechanisms of mechanical vehicle road lighting devices exterior.
Key words: road illumination devices, certification, wear tests.

*Адрес для переписки: Балохонов Д. В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: balokhonov@bntu.by*

В современной светотехнике пластмассовые рассеиватели в фарах и системах адаптивного освещения практически полностью вытеснили аналоги из стекла, поскольку обладают неоспоримыми технологическими преимуществами.

Однако проблемы старения и износа внешней поверхности рассеивателей в результате разнообразных внешних воздействий и связанные с этим проблемы деградации светового распределения фар остаются одной из приоритетных задач обеспечения безопасности дорожного движения.

Среди разнообразных и многочисленных воздействующих факторов доминирует абразивный износ поверхности рассеивателей под действием водно-песчаных смесей, особенно в присутствии химических реагентов в зимний период.

Поэтому при сертификации устройств и систем освещения дороги механических транспортных средств обязательной является процедура испытаний на устойчивость к износу полимерных рассеивателей устройств освещения дороги механических транспортных средств в соответствии с приложением 8 Правил ООН № 149 [1]. Суть ис-

пытаний на устойчивость к механическому износу устройств освещения дороги механических свойств состоит в следующем: на рассеиватель фары равномерно распыляется водно-песчаная смесь строго заданного состава в строго определенных условиях, и контролируется изменение коэффициента пропускания и рассеивания света. При этом прошедшими сертификацию с положительным результатом считаются изделия, коэффициенты пропускания и рассеивания света которых не выходят за обозначенные в ТНПА пределы. Чтобы реализовать методику измерения коэффициента пропускания и коэффициента рассеивания света, приведенную в Правилах ООН № 149, была создан и аккредитован испытательный комплекс, состоящий из двух основных частей.

Первой частью испытательного комплекса является испытательный стенд, имитирующий действия механизмов гидроабразивного износа рассеивателя в условиях реальной дорожной эксплуатации (попадание песка, камней и пыли в водяных струях или каплях практически нормально к поверхности рассеивателя), что обеспе-

чивает возможность применения установки для проведения контрольных и исследовательских испытаний полимерных материалов на устойчи-

вость к механическому износу, оценке качества защитных покрытий рассеивателей механических транспортных средств.

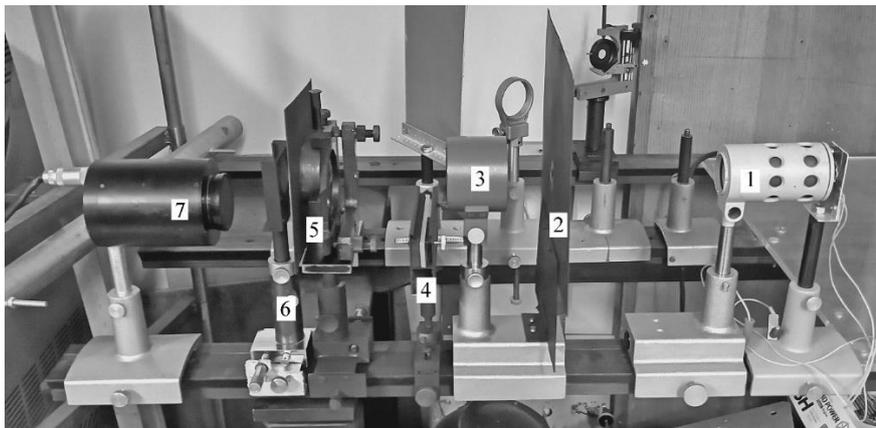


Рисунок 1 – Измерительная установка

Испытательный стенд предназначен для распыления водно-песчаной смеси на изделия, проходящие испытания (или на образцы их рассеивателей, если изделия слишком большие и их нельзя испытывать целиком). Он включает в себя герметичную емкость, куда помещается образец, форсунку для распыления водно-песчаной смеси и устройство для контроля угла атаки струи по отношению к рассеивателю. Водно-песчаная смесь при испытаниях циркулирует по замкнутому контуру с помощью компрессора, который обеспечивает заданное давление и скорость истечения смеси. Это позволяет не добавлять смесь во время испытаний даже при больших образцах или длительных испытаниях.

Второй частью испытательного комплекса является измерительная установка для проверки оптических характеристик рассеивателей до и после абразивных воздействий водно-песчаных смесей. В качестве контролируемых параметров используются коэффициент пропускания и коэффициент рассеивания света рассеивателя устройства освещения дороги механических транспортных средств.

Вид измерительной установки, предназначенной для измерения коэффициента пропускания и коэффициента рассеивания света рассеивателей приведен на рисунке 1.

Однородный пучок света от источника 1 проходит через диафрагму 2 и попадает на коллиматор 3. Луч коллиматора ограничен диафрагмой с отверстием 6 мм. Напротив коллиматора устанавливается измеряемый образец, закрепленный в держателе 4. Рассеянный образцом свет попадает на собирающую линзу 5, в плоскости фокуса которой установлена кольцевая диафрагма 6. Линза не должна иметь сферических aberrаций, а ее размер должен исключить возможные потери рассеянного света.

Непрозрачная центральная часть диафрагмы необходима для того, чтобы исключить часть света, падающего непосредственно от источника. Для

определения исходного первоначального потока света центральная часть диафрагмы убирается.

Для регистрации изменений светового потока использовалась измерительная головка фотоприемника 7 фотометра LMT S1000.

Согласно требованиям Правил ООН № 149, точность измерения света должна быть не хуже 0,1 %, если принять весь падающий световой за 100 %.

В отличие от своих аналогов, предлагаемый испытательный комплекс имеет следующие преимущества:

1. Длительность воздействий водно-песчаной смеси может быть произвольно задана, что позволяет путем предварительных измерений определить время испытаний рассеивателей и снизить вероятность ошибки первого и второго рода при сертификации.

2. В испытательном стенде предусмотрена возможность повторно использовать водно-песчаную смесь, что позволяет уменьшить затраты времени на подготовку к испытаниям.

3. Испытательный комплекс позволяет проводить испытания в приспособленных помещениях, так как вся водно-песчаная смесь содержится внутри герметичного испытательного резервуара, не проникает наружу и не создает дополнительного загрязнения.

Литература

1. Concerning the Adoption of Harmonized Technical United Nations Regulations for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these United Nations Regulations. Addendum 148 – UN Regulation № 149. Uniform provisions concerning the approval of road illumination devices (lamps) and systems for power-driven vehicles // UNECE [Electronic resource]. – 2019. – Mode of access : <https://unece.org/sites/default/files/2021-05/R149e.pdf>.

УДК 681.2.083

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ
НА КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ ПУТЕМ МИНИМИЗАЦИИ МАРШРУТА
ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЩУПА
Сидоренко В. В., Габец В. Л.**

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Координатно-измерительные машины (КИМ) широко используются в различных отраслях промышленности для точных измерений и контроля качества. Одной из ключевых задач, стоящих перед инженерами, является повышение производительности измерений без ущерба для точности. Однако процесс измерения может занимать много времени, что приводит к снижению производительности. В данной статье рассматривается метод минимизации маршрута чувствительного элемента как способ повышения производительности координатно-измерительных машин.

Ключевые слова: координатно-измерительная машина, датчик, маршрут.

**IMPROVED MEASUREMENT PERFORMANCE ON COORDINATE MEASURING MACHINES
BY MINIMIZING THE PATH OF THE TOUCH PROBE
Sidorenko V., Habets V.**

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract: Coordinate measuring machines (CMMs) are widely used in a variety of industries for precision measurement and quality control. One of the key challenges facing engineers is to increase measurement productivity without compromising accuracy. However, the measurement process can be time-consuming, resulting in a decrease in productivity. This paper discusses the sensing element path minimization method as a way to improve the productivity of coordinate measuring machines.

Key words: coordinate measuring machine, sensor, route.

*Адрес для переписки: Сидоренко В. В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by*

В настоящее время координатно-измерительные машины (КИМ) широко используются в различных отраслях промышленности и играют ключевую роль в процессах контроля качества. Непрерывное усовершенствование и стремительное развитие науки и техники сопровождается резким увеличением числа измерений и значительным ужесточением требований к точности [1].

Несмотря на достаточное многообразие КИМ и их постоянное совершенствование, из-за сложности приборов, зачастую недостаточной квалификации операторов, а также нехватки рекомендаций производителей машин и справочных материалов по выполнению координатных измерений и обработке полученных результатов, у пользователей этих средств координатных измерений возникает ряд трудностей и нерешенных вопросов [2].

Одним из основных факторов, влияющих на производительность измерений, является оптимизация маршрута, который проходит датчик во время измерений. Процесс измерения может занимать много времени, что приводит к снижению производительности. Данная работа рассматривает методы минимизации маршрута датчика на КИМ для повышения производительности измерительных процессов. Ведь оптимизируя перемещение датчика, мы можем значительно сократить время измерения, что приведет к повышению эффективности и производительности.

Современные производственные процессы требуют высокой точности и скорости измерений. КИМы обеспечивают автоматизированный контроль геометрических параметров изделий.

Измерительные головки КИМ позволяют определять координаты точки касания относительно центра шара щупа в плоскости, перпендикулярной оси щупа. Щуповые шары изготавливают из рубина, керамики или твердых сплавов. На практике используются различные по размерам и назначению измерительные головки (рисунок 1), позволяющие увеличить производительность, осуществлять измерения труднодоступных поверхностей и тонкостенных элементов. Головки оснащаются щупами.

Исходная траектория перемещения щупа рассчитывается автоматически и изображается на экране для просмотра и редактирования. При редактировании определяются пересечения траектории с поверхностью детали. Обеспечивается контроль точности в заданном сечении, а также параметризация размеров для измерений семейств деталей.

Процесс измерения отображается на экране в реальном масштабе времени в виде текущих значений положения щупа и отклонения формы.

Неэффективный маршрут движения датчика может существенно увеличить время измерений, вызывая, таким образом, задержки в производственном процессе.

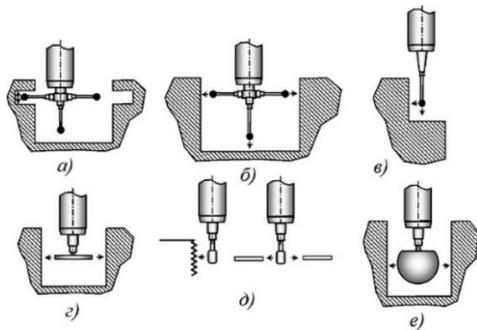


Рисунок 1 – Схемы измерения и конструкции измерительных головок: а – измерение глубины и ширины канавок, б – измерение глубины и ширины полости; в – универсальная измерительная головка с шаровым щупом; г – измерение дисковым щупом; д – измерения цилиндрическим щупом резьбовых и рифленых поверхностей, а также отверстий в листовом материале; е – измерение сферическим щупом

Традиционные методы измерений часто не учитывают установленные закономерности в распределении координат точек, что приводит к неоптимальному движению инструмента. Целью настоящего исследования является разработка алгоритмов, направленных на минимизацию маршрута датчика на КИМ, что позволит значительно увеличить производительность измерительного процесса.

Для достижения поставленной цели предложены следующие шаги:

1. **Анализ существующих маршрутов:** изучение текущих методов измерения и их маршрутов. определение набора точек, которые необходимо измерить, и их координат в пространстве.

2. **Моделирование маршрута:** существуют различные алгоритмы для оптимизации маршрута щупа, среди которых:

- **жадные алгоритмы** – на каждом шаге выбирается ближайшая точка, что может привести к оптимальному маршруту;

- **генетические алгоритмы** – применяют принципы естественного отбора для поиска оптимального маршрута, но требуют больших вычислительных ресурсов;

- **алгоритмы рабочего времени** – учитывают как расстояние между точками, так и время, затраченное на перемещение.

Необходимо также учитывать параметры, влияющие на выбор маршрута такие как:

- конфигурация маршрута;
- точность и допустимые погрешности измерений;
- общая длина маршрута;
- Энергетические затраты на перемещение.

3. **Оптимизация алгоритмов:** Применение методов оптимизации, таких как генетические алгоритмы и жадные подходы, для нахождения минимального маршрута.

4. **Экспериментальная проверка:** Проведение серии экспериментов на КИМ с целью сравнения времени измерения до и после оптимизации. **Анализ маршрутов.** Первоначально были проанализированы маршруты измерения для трех различных деталей (А, В, С). Время, которое было затрачено на измерение каждой детали отражено в Таблице 1.

Таблица 1 – Результаты первоначальных измерений

Деталь	Время измерения (с)	Количество точек	Длина маршрута (мм)
А	120	30	500
В	150	45	750
С	180	60	900

Оптимизация маршрута

После применения алгоритмов маршруты были откорректированы. Результаты проведенной оптимизации приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты измерений после оптимизации маршрута щупа

Деталь	Время измерения, (с)	Количество точек	Длина маршрута, (мм)
А	90	30	350
В	110	45	500
С	140	60	700

Сравнительный анализ данных

Сравнив таблицы 1 и 2 можно заметить снижение времени измерения после оптимизации алгоритмов для каждой из деталей.

При тестировании различных методов на реальных данных производственного процесса удалось добиться сокращения времени измерений в среднем на 20-30%. Такие цифры подтверждают значимость минимизации маршрута не только с точки зрения временных затрат, но и энергетических ресурсов, используемых КИМ.

Внедрение алгоритмов оптимизации маршрута в практику измерений на КИМ открывает новые горизонты для повышения производительности. Однако, как показывает практика, важно учитывать специфику конкретной производственной среды и тип измеряемых деталей, чтобы адаптировать алгоритмы под определенные условия.

Проведенное исследование подтверждает целесообразность применения методов минимизации маршрута чувствительного щупа для повышения производительности измерений на координатно-измерительных машинах.

Литература

1. Кундикова, Е. А. Тенденции развития координатно-измерительных приборов / Е. А. Кундикова, О. А. Кротова. – Минск: БНТУ, 2010. – 286 с.
2. Соколовский, С. С. Некоторые особенности трактовки результатов координатных измерений и перспективы повышения качества координатного контроля геометрических параметров деталей / С. С. Соколовский, А. А. Хмелевская – Минск: БНТУ, 2014. – С. 217–219.

УДК 001.893:65.011.56:658.562

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ

Соколовский С. С., Мишуткин И. А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Предложена конструкция специального средства измерений для повышения эффективности контроля наиболее сложного функционального геометрического параметра долота шарошечного, определяющего качество его функционирования.

Ключевые слова: долото шарошечное, функциональный геометрический параметр, контроль, специальное средство измерений.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF METROLOGICAL SUPPORT FOR THE PRODUCTION OF ROLLER CONE BITS

Sokolovsky S., Mishutkin I.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A design of special measuring instrument is proposed to increase the efficiency of monitoring the most complex functional geometric parameter of roller bit, which determines the quality of its operation.

Key words: Roller bit, functional geometric parameter, control, special measuring instrument.

Адрес для переписки: Соколовский С. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: s.s.sokolovsky@gmail.com

Шарошечные долота являются высокоэффективным бурильным инструментом и принцип шарошечного бурения состоит в том, что вращение корпуса устройства обеспечивает вращение подвижных зубчатых элементов конструкции (так называемых шарошек) вокруг своих осей, а они в свою очередь и приводят к разрушению породы. Конструкция такого инструмента в виде трехшарошечного долота представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид долота шарошечного

В составе данного изделия одной из наиболее важных и сложных в изготовлении и контроле является деталь под названием «лапа». Непосредственно на «лапе» выполнена тороидальная поверхность, являющаяся одной из дорожек качения специального подшипника качения, на котором вращается шарошка. Ключевым функциональным геометрическим параметром этой детали является расстояние от ее торцевой номинально плоской поверхности, по которой базируется «лапа» в составе изделия, до плоскости симметрии выполненной на ней тороидальной дорожки качения подшипника. Графическая интерпретация данного параметра представлена на рисунке 2.

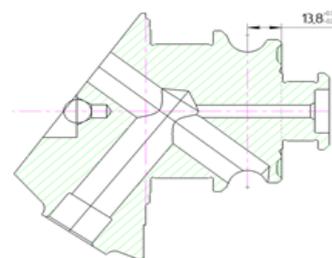
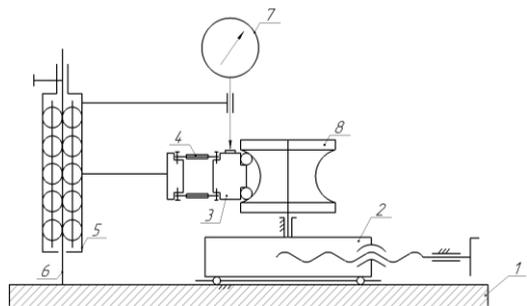


Рисунок 2 – Функциональный геометрический параметр детали, подлежащий контролю

Различие действительных значений этого параметра у различных «лап», входящих в состав одного изделия (для варианта многошарошечного долота), будет приводить к неравномерности распределения нагрузки между отдельными шарошками. Кроме этого, разноразмерность рассматриваемого параметра в разных продольных сечениях одной и той же «лапы» будет приводить к соответствующим торцевым биениям установленной на ней шарошки при ее вращении и как результат – к увеличению динамических нагрузок на нее и повышению ее износа. Все это определяет важность и необходимость обеспечения требуемой высокой достоверности контроля выделенного функционального геометрического параметра рассматриваемой детали. Специфика этого параметра и особенности конфигурации детали, являющейся его «носителем», не позволяют использовать напрямую для его контроля какие-либо стандартизованные универсальные средства измерений и требуют разработки специального средства измерения. Используемое в настоящее

время на предприятии, выпускающем такую продукцию, для решения описанной выше измерительной задачи специальное накладное средство измерения не обеспечивает требуемую повторяемость результатов измерений, оно крайне неудобно в настройке и при реализации измерительной процедуры. С учетом выделенных обстоятельств в [1] предложена принципиальная схема контрольного приспособления станкового типа для решения рассматриваемой измерительной задачи. Проведенная функциональная метрологическая экспертиза такого варианта конструктивного решения требуемого средства измерения показала, что на его основе весьма сложно обеспечить требуемую точность измерения. Основной причиной этого, является то, что в конструкцию такого средства измерения входят направляющие качения, которые должны обеспечивать требуемое измерительное перемещение чувствительного элемента прибора с необходимой точностью. Такие направляющие сложны в изготовлении и представленный там вариант их исполнения характеризуются рядом специфических источников инструментальной погрешности измерения. Исходя из этого, предлагается усовершенствованный вариант такого средства измерения, который лишен описанных выше недостатков, представленный на рисунке 3.



1 – станина; 2 – каретка; 3 – корпус чувствительного элемента; 4 – упругая подвеска чувствительного элемента (плоско-пружинный параллелограмм); 5 – направляющие установочного перемещения измерительного модуля; 6 – стойка; 7 – измерительная головка (преобразователь); 8 – контролируемая деталь («лапа»)

Рисунок 3 – Средство измерения расстояния от базовой торцевой номинально плоской поверхности контролируемой детали до плоскости симметрии ее торoidalной поверхности

В конструкции такого средства измерений направляющие качения используются только для осуществления установочных перемещений измерительного модуля и контролируемой детали, при этом измерительные перемещения в вертикальном направлении комбинированного чувствительного элемента обеспечиваются за счет его установки на упругой подвеске в виде плоско-пружинного параллелограмма.

Такого типа упругие направляющие широко используются в различных прецизионных механизмах и обеспечивают очень высокую точность перемещения их подвижных элементов, поскольку в них отсутствуют какие-либо зазоры в сопряжениях их отдельных элементов. Достоинством данного средства измерения является также то, что для его настройки нет необходимости использовать образцовую или аттестованную деталь высокой точности, поскольку такую процедуру в данном случае можно осуществить непосредственно по концевым мерам длины по схеме, представленной на рисунке 4.

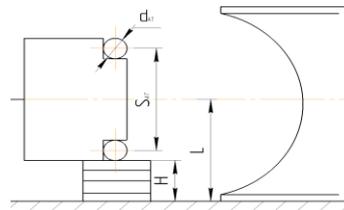


Рисунок 4 – Схема настройки средства измерений на контролируемый размер по концевым мерам длины

При настройке средства измерения по такой схеме требуемую высоту используемого блока концевых мер длины можно рассчитать по формуле:

$$H = L - S_{ат}/2 - d_{ат}/2,$$

где L – номинальное значение контролируемого размера детали; $S_{ат}$ и $d_{ат}$ – аттестованные размеры межосевого расстояния между роликами и диаметра роликов чувствительного элемента прибора.

После настройки средства измерения рассмотренным выше образом измерительная процедура реализуется в следующем порядке.

Контролируемая деталь, базирующаяся на каретке прибора, путем вращения маховичка привода перемещается в соответствующем направлении передвигается в направлении его чувствительного элемента. При касании роликов чувствительного элемента контролируемой поверхности детали его корпус, подвешенный на упругой подвеске, перемещается вверх или вниз в соответствии с отклонением действительного размера контролируемого параметра детали от номинального его значения, на которое был настроен прибор. Такое смещение чувствительного элемента фиксируется с помощью измерительной головки (преобразователя), неподвижно установленной на стойке прибора.

Литература

1. Мишуткин, И. А. Совершенствование методики контроля функционального геометрического параметра детали шарошечного долота / И. А. Мишуткин, С. С. Соколовский // Материалы 17-ой Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения». – 2024.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ РАЗМЕРНОЙ ЦЕПИ

Спесивцева Ю. Б., Лужинская А. И.

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Измерительные размерные цепи позволяют рассчитать погрешность измерения и распределить требуемую точность между источниками. Наиболее сложной для анализа является инструментальная составляющая погрешности при использовании контрольных приспособлений. Пример такого расчета рассмотрен в работе.

Ключевые слова: измерительная размерная цепь, контрольное приспособление, погрешность измерения.

METHODOLOGY FOR CALCULATING A MEASUREMENT DIMENSIONAL CHAIN

Spesivtseva Y., Luzhinskaya A.

Belarusian National Technical University,
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Measuring dimensional chains allow for the calculation of measurement error and the distribution of the required accuracy among the sources. The most complex part of the analysis is the instrumental component of the error when using control devices. An example of such a calculation is presented in the paper.

Keywords: measurement dimensional chain, control device, measurement error.

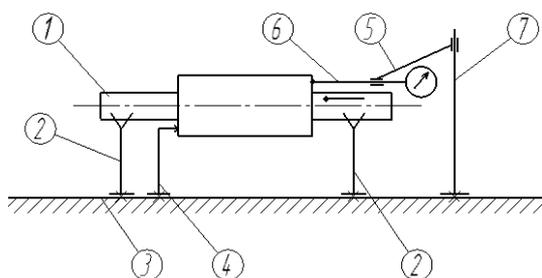
Адрес для переписки: Спесивцева Ю. Б., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: spesivtseva@bntu.by

Размерные цепи широко используются при проектировании изделий и технологических процессов, тогда как измерительные размерные цепи в настоящее время не нашли широкого применения.

Целью работы является апробация методики обеспечения требуемой точности измерения путем составления и расчета измерительной размерной цепи, построенной с помощью метрологического моделирования измерительного контроля на уровне схемы [1].

Контролируемым параметром является торцовое биение детали гильза, имеющей форму тонкостенной трубы, с допуском 200 мкм.

Допустимая погрешность измерения составляет 1/3 допуска на параметр: $[\Delta] = 66,7$ мкм. Схема контроля торцового биения представлена на рисунке 1.



1 – оправка разжимная; 2 – призмы; 3 – плита; 4 – упор; 5 – кронштейн; 6 – прибор; 7 – стойка

Рисунок 1 – Схема контроля торцового биения

Погрешность измерения Δ образуется в результате объединения составляющих:

инструментальной $\Delta_{\text{си}}$, методической $\Delta_{\text{м}}$, отличия условий измерения от нормальных $\Delta_{\text{у}}$, субъективной $\Delta_{\text{оп}}$. При измерении используется индикатор рычажно-зубчатый ИРБ с ценой деления 0,01 мм и пределом измерения 0,8 мм при измерении биения. Погрешность, вносимую оператором, примем равной половине цены деления шкалы прибора $\Delta_{\text{оп}} = 0,005$ мм.

Методическая погрешность, возникающая из-за идеализации объекта измерения (отклонение формы отверстия от цилиндричности) не учитывается, т.к. используется разжимная оправка и погрешность будет второго порядка малости.

Наибольший вклад в погрешность измерения вносит прибор и базирующее приспособление.

Определим допустимое значение инструментальной составляющей погрешности измерения:

$$[\Delta_{\text{присп}}] = \sqrt{\Delta^2 - \Delta_{\text{оп}}^2 - \Delta_{\text{м}}^2 - \Delta_{\text{у}}^2 - \Delta_{\text{инд}}^2}$$

$$[\Delta_{\text{присп}}] = 49,4 \text{ мкм}$$

Погрешность базирующего приспособления является комплексной и включает в себя следующие составляющие:

- 1) перекося индикатора 6 в отверстии кронштейна 5 в пределах зазора;
- 2) перекося отверстия кронштейна 5 относительно стойки 7 в пределах зазора;
- 3) отклонение от прямолинейности стойки 7;
- 4) отклонение от перпендикулярности стойки 7 и плиты 3;
- 5) отклонение от плоскости плиты 3;
- 6) разновысотность призм;

7) разница диаметров базисуемых поверхностей оправки;

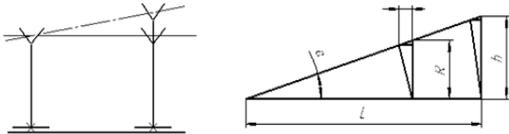
8) отклонение профиля поперечного сечения базисуемых поверхностей оправки;

9) отклонение от соосности базисуемых поверхностей оправки.

Первые пять составляющих погрешности не учитываются, т. к. измерения проводятся без вспомогательных перемещений в процессе измерения.

Погрешность, вызванная разновысотностью призм рассчитывается с помощью схемы на рисунке 2:

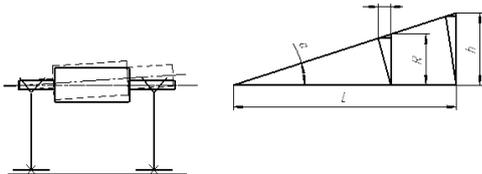
$$\Delta = \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot h = \left(\frac{h}{l}\right)^2 \cdot R = \left(\frac{0,120}{120}\right)^2 \cdot 19,5 = 0,02 \text{ мкм.}$$



l – расстояние между призмами; h – допуск на размер (высота призм 50...80 мм, 10 квалитет); R – радиус детали

Рисунок 2 – Схема для расчета погрешности, вызванной разновысотностью призм

Погрешность, вызванная разницей диаметров базисуемых поверхностей оправки, так же включает в себя погрешность из-за отклонений профиля продольного сечения базисуемых поверхностей оправки, когда одна поверхность имеет седлообразную форму, а вторая бочкообразную. Рассчитывается аналогично предыдущей составляющей (рисунок 3).



l – расстояние между призмами; h – допуск на размер (диаметр оправки 15 мм, 8 квалитет точности); R – радиус детали

Рисунок 3 – Схема для расчета погрешности, вызванной разницей диаметров базисуемых поверхностей оправки:

$$\Delta = \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot R = \left(\frac{h}{l}\right)^2 \cdot R = \left(\frac{0,072}{120}\right)^2 \cdot 19,5 = 0,007 \text{ мкм.}$$

При расчете значения погрешности, вызванной отклонением профиля поперечного сечения базисуемых поверхностей оправки, рассматривается два случая:

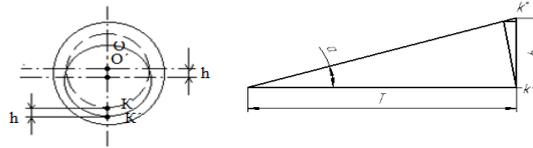
- только одна из базисуемых поверхностей имеет отклонение от круглости;
- обе базисуемые поверхности имеют отклонение от круглости.

В первом случае овальность вызывает перекокс оси детали на величину овальности:

$$h = d_{\max} - d_{\min} = 0,072 \text{ мм,}$$

$$\Delta = \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot R = \left(\frac{h}{l}\right)^2 \cdot R = \left(\frac{0,072}{120}\right)^2 \cdot 19 = 0,007 \text{ мкм.}$$

Второй случай (рисунок 4) приводит к смещению оси окружности, по которой осуществляется измерения торцового биения. Смещение происходит на величину овальности: $h = 0,072$ мм. Эту погрешность можно представить как перекокс наконечника на некоторый угол γ , из-за чего он при измерении может сместиться из точки k в точку k' .



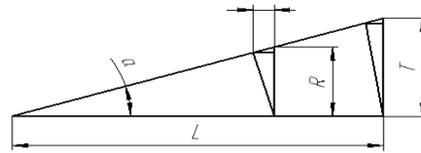
h – смещение оси; T – допуск торцового биения

Рисунок 4 – Схема для расчета погрешности, вызванной отклонением профиля от круглости базисуемых поверхностей оправки

$$\Delta = \operatorname{tg} \alpha \cdot h = \frac{h}{T} \cdot h = \frac{0,072^2}{200} = 26 \text{ мкм,}$$

где T – допуск торцового биения.

Погрешность, вызванная отклонением от соосности базисуемых поверхностей оправки, рассчитывается по схеме рисунка 5.



l – длина оправки; T – допуск соосности

Рисунок 5 – Схема для расчета погрешности, вызванной отклонением от соосности базисуемых поверхностей оправки

$$\Delta = \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot R = T/l^2 \cdot R = 0,031502 \cdot 19,5 = 0,0008 \text{ мкм.}$$

Погрешность базисуемого приспособления:

$$\Delta_{\text{присп}} = \sqrt{(\Delta_6)^2 + (\Delta_7)^2 + (\Delta_8)^2 + (\Delta_9)^2} = 28,03 \text{ мкм,}$$

$$[\Delta_{\text{присп}}] > \Delta_{\text{присп}}$$

Результат расчета подтверждает, что контрольное приспособление, спроектированное на основе рассмотренной схемы, будет обеспечивать требуемую точность измерения.

Литература

1. Цитович, Б. В. Метрологическая экспертиза и нормоконтроль: учеб.-методич. пособие / Б. В. Цитович, Н. А. Воробьев, М. С Капица. – Минск: БГАТУ, 2015. – 340 с.

УДК 53.089.6:519.2 (045)

ПРИНЦИП МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОСТИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ОПТИМАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦ ВЕЛИЧИН ПРИ ПОВЕРКЕ

Соломахо В. Л.¹, Червяковская Н. Н.²

¹Белорусский национальный технический университет,

²Белорусский государственный институт метрологии,

г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье сформулирован и разработан новый методический принцип построения оптимальных систем передачи единиц величин при поверке – принцип многокритериальности, включающий в себя систематизированный перечень взаимосвязанных параметров (метрологических, структурных, организационно-технических, экономических), необходимых и достаточных для их построения.

Ключевые слова: системы передачи единиц величин, принцип многокритериальности.

THE MULTICRITERION PRINCIPLE OF DEVELOPMENT OF THE OPTIMAL SYSTEMS FOR TRANSFERRING OF THE SIZE OF THE UNITS OF QUANTITIES FOR VERIFICATION

Solomakho V.¹, Chervyakovskaya N.²

¹The BeloRussian Federation National Technical University

²The BeloRussian Federation State Institute of Metrology

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. In article the new methodical principle of development of optimal systems for transferring of the size of the units of quantities for verification – the multicriterion principle are formulated and developed. This principle states the systematized list of inter-connected parameters (metrological, structural, technical-organizational, economic), which are essential and sufficient for the development of the optimal systems for transferring of the size of the units of quantities.

Key words: systems for transferring of the size of the units of quantities, multicriterion principle.

Адрес для переписки: Соломахо В. Л., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: v.solomakho@gmail.com; metrol@belgim.by

Главная задача государственной метрологической службы Республики Беларусь – обеспечение единства измерений применяемых в стране средств измерений (далее – СИ), основным организационно-техническим мероприятием которого является поверка.

Разработка и совершенствование национальной эталонной базы в Республики Беларусь, внедрение новых поверочных схем для разрабатываемых национальных эталонов, производство и внедрение новых типов СИ, увеличение объемов СИ, представляемых на поверку, ставят перед органами государственной метрологической службы Республики Беларусь задачу четкой организации и проведения поверки СИ, эксплуатируемых в реальном секторе экономики и производства, в установленные сроки с минимальными экономическими затратами, которая является комплексной технико-экономической задачей прикладной метрологии.

Для построения оптимальных систем передачи размера единиц величин, реально функционирующих при поверке СИ (далее - СПЕВ), необходимо располагать не только метрологическим порядком передачи размера единицы величины от национального эталона к СИ, законодательно утвержденным в виде поверочной схемы, но и создавать соответствующую метрологическую инфраструктуру передачи единиц величин, содер-

жащую необходимое количество рабочих мест поверителей, эталонов основного и резервного фонда, оптимально распределенные потоки СИ, поступающих на поверку, и т. д., способную оперативно и в установленные сроки осуществлять поверку заданного количества СИ с минимальными экономическими затратами.

Многоцелевая постановка задачи функционирования СПЕВ при поверке требует многокритериального подхода при их построении и оптимизации.

Для построения оптимальных СПЕВ предлагается применять новый методический принцип - принцип многокритериальности: для построения оптимальных СПЕВ при поверке, обеспечивающих рациональную организацию и проведение поверки заданного количества СИ в установленные сроки с минимальными экономическими затратами, необходимо рассматривать 4 группы взаимосвязанных, систематизированных параметров (метрологических, структурных, организационно-технических и экономических), необходимых и достаточных для их построения:

$$\{X\} = \{X_{\text{метр}}, X_{\text{стр}}, X_{\text{орг}}, X_{\text{эк}}\} \quad (1)$$

На основе квалиметрической оценки выделен перечень параметров, задающих СПЕВ, и распределен по 4 группам параметров (метрологические, структурные, организационно-технические и экономические), характеризующим их роль в

решении общей задачи рациональной организации и проведения поверки СИ, а также выделены показатели, определяющие их количественно:

$X_{\text{метр}}$ – метрологические параметры (1 группа):

– X_{11} – погрешности СИ (национальные эталоны, эталоны, рабочие эталоны, средства измерений), участвующих в СПЕВ;

– X_{12} – погрешности методов передачи единиц величин;

– X_{13} – соотношения пределов допускаемых погрешностей (доверительных границ погрешностей) эталонов и поверяемых СИ;

– X_{14} – критерии достоверности поверки, обусловленные условными вероятностями ошибок поверки 1-го и 2-го рода (вероятность признания годными дефектных СИ (необнаруженный брак) и вероятность признания негодными в действительности годных СИ (фиктивный брак));

$X_{\text{стр}}$ – структурные параметры (2 группа):

– X_{21} – количество ступеней передачи единиц величин в СПЕВ;

$X_{\text{орг}}$ – организационно-технические параметры (3 группа):

– X_{31} – количество рабочих мест поверителей в СПЕВ;

– X_{32} – количество рабочих эталонов основного фонда в СПЕВ;

– X_{33} – количество эталонов основного фонда по ступеням передачи единиц величин в СПЕВ;

– X_{34} – количество рабочих эталонов резервного фонда в СПЕВ.

$X_{\text{эк}}$ – экономические параметры (4 группа):

– X_{41} – экономические затраты на разработку, создание, внедрение и эксплуатацию национальных эталонов;

– X_{42} – экономические затраты на разработку (приобретение), внедрение и эксплуатацию эталонов в СПЕВ;

– X_{43} – экономические затраты на разработку (приобретение), внедрение и эксплуатацию рабочих эталонов в СПЕВ;

– X_{44} – экономические затраты на приобретение, внедрение и эксплуатацию средств измерений в СПЕВ.

Метрологические параметры $X_{\text{метр}}$ определяют требуемый уровень точности передачи единиц величин от национального эталона к СИ в поверочной схеме:

$$\{X_{\text{метр}}\} = \{X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}\} \quad (2)$$

Структурные параметры $X_{\text{стр}}$ определяют количество ступеней Q_i передачи единицы вели-

чины разрабатываемой структуры поверочной схемы, являющейся одновекторной СПЕВ, законодательно утвержденной в виде ТНПА. Структура прост-ранственной СПЕВ, реально функционирующей при проведении поверки СИ, должна учитывать территориальное расположение эталонов, участвующих в передаче единиц, их количество и пропускную способность, что позволит оптимальным образом распределить поверочные потоки СИ в СПЕВ относительно эталонов:

$$\{X_{\text{стр}}\} = \{X_{21}\} \quad (3)$$

Организационно-технические параметры $X_{\text{орг}}$ характеризуют организационно-технические возможности и способности СПЕВ оперативно и эффективно осуществлять поверку заданного количества СИ в течение их интервала времени между поверками:

$$\{X_{\text{орг}}\} = \{X_{31}, X_{32}, X_{33}, X_{34}\} \quad (4)$$

Экономические параметры $X_{\text{эк}}$ характеризуют экономические затраты на создание, внедрение и функционирование СПЕВ как элемента СОЕИ по обеспечению поверкой СИ определенного вида измерений:

$$\{X_{\text{эк}}\} = \{X_{41}, X_{42}, X_{43}, X_{44}\} \quad (5)$$

На основе параметров, включенных в принцип многокритериальности, построим, построим систему и вектор метрологических, структурных, организационно-технических и экономических параметров, задающих СПЕВ при их построении:

$$\begin{cases} \{X_{\text{метр}}\} = \{X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}\}, \\ \{X_{\text{стр}}\} = \{X_{21}\}, \\ \{X_{\text{орг}}\} = \{X_{31}, X_{32}, X_{33}, X_{34}\}, \\ \{X_{\text{эк}}\} = \{X_{41}, X_{42}, X_{43}, X_{44}\} \end{cases} \quad (6)$$

$$\{X\} = \{X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{21}, X_{31}, X_{32}, X_{33}, X_{34}, X_{41}, X_{42}, X_{43}, X_{44}\} \quad (7)$$

Таким образом, сформулирован и разработан новый методический принцип построения СПЕВ – принцип многокритериальности, обеспечивающий построение оптимальных СПЕВ, обеспечивающих необходимый уровень точности передачи единиц величин, позволяющих оперативно и в установленные сроки осуществлять поверку всех СИ, для которых создается СПЕВ, и являющихся экономически целесообразными.

УДК 658.562

**СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА И КОНЦЕПЦИЯ «БЕРЕЖЛИВОЕ ПРОИЗВОДСТВО»
ИНТЕГРИРОВАТЬ НЕЛЬЗЯ РАЗДЕЛЯТЬ?**

Фурс М. С., Серенков П. С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В данной статье обоснована необходимость научного подхода внедрения концепции «бережливого производства» в рамках действующей системы менеджмента качества с целью повышения конкурентоспособности промышленных предприятий. Идентифицирована основная проблема внедрения концепции «бережливого производства». Представлен алгоритм внедрения концепции «бережливого производства» в рамках СМК.

Ключевые слова: система менеджмента качества, бережливое производство, алгоритм интеграции.

**QUALITY MANAGEMENT SYSTEM AND THE CONCEPT OF “LEAN PRODUCTION” CANNOT
BE INTEGRATED TO BE SEPARATED?**

Furs M., Serenkov P.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. This article describes the need for a scientific approach to introducing the concept of «lean production» within the framework of the current quality management system in order to increase the competitiveness of industrial enterprises. The main problem of introducing the concept of “lean production” is highlighted. An algorithm for introducing the concept of “lean production” within the framework of the QMS is presented.

Key words: quality management system, lean manufacturing, integration algorithm.

*Адрес для переписки: Фурс М. С. пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: mariya.sergeevna.furs@gmail.com*

В условиях глобальной неопределенности бизнес сталкивается с непростыми вызовами, требующими гибкости и адаптации. Новый контекст диктует необходимость пересматривать стратегические приоритеты и развивать альтернативные каналы коммуникации с стейкхолдерами. Закрытие рынков и уход иностранных компаний вынуждают отечественных производителей искать новые пути для реализации продукции и выйти на непривычные сегменты. Важно не просто выжить, но и искать возможности для роста в условиях изменяющейся конкурентной среды.

Параллельно с этим возникает необходимость в переосмыслении ключевых бизнес-процессов, оптимизации цепочек поставок и диверсификации рисков. В современных условиях конкуренция на рынке становится как никогда острой. Компании, столкнувшись с сокращением спроса и ухудшением финансовых показателей, начинают активно бороться за каждого клиента. Этот процесс ведет к появлению новых стратегий, которые позволяют организациям адаптироваться к изменившейся реальности.

Основные составляющие конкурентоспособности: качество, рентабельность и производительность.

Республика Беларусь стремится занять достойное место на международной арене, и это возможно только при условии повышения качества продукции и услуг.

Достижение поставленной цели на многих предприятиях достигается за счет внедрения пра-

вильно выстроенной системы менеджмента качества (далее – СМК), основанной на международных стандартах ISO серии 9000. Однако, в условиях ограниченности природных ресурсов бережное отношение к ним становится приоритетом. Это подразумевает не только экономию, но и внедрение перспективных технологий, которые позволяют более эффективно использовать имеющиеся ресурсы и снижать потери производства.

То есть возникает потребность в создании системы менеджмента качества, отличной от классического ее понимания – ориентированной не только на производстве качественной продукции, но и с аспектом на поиске и устранении потерь производства. Данная система управления должна учитывать все этапы производственного процесса, от разработки до утилизации продукции, обеспечивая интеграцию всех участников процесса. Необходимость оптимизации ресурсов, максимизация эффективности операций и минимизация затрат становятся ключевыми факторами, влияющими на конкурентоспособность предприятия.

Кроме того, эффективное управление качеством подразумевает не только контроль на выходе, но и проактивный подход к анализу каждого этапа производства. В этой связи акцент в разработке методов и инструментов СМК должен смещаться в сторону раннего выявления потенциальных проблем и источников потерь. Современные вызовы, с которыми сталкиваются предприятия,

требуют пересмотра и оптимизации существующих традиционных подходов к управлению и организации работы.

Исходя из этого концепцию «бережливое производство» нужно рассматривать не как дополнение СМК, или отдельную систему управления, а как следующую стадию ее развития.

Анализ практики внедрения концепции «бережливого производства» на таких предприятиях, как ОАО «Белкоммунмаш» и ОАО «МТЗ» и др., следует отметить, что данные организации или пользовались переводными материалами, или придумывали собственные определения и интерпретацию терминов. При этом техника реализации «бережливых процессов» как правило приводит к фрагментарным результатам. Вследствие чего, нередко наблюдается отсутствие координации между различными уровнями управления, что затрудняет достижение согласованных целей и ощутимых результатов. Практика показывает также, что многие организации сталкиваются с трудностями в определении ключевых показателей эффективности, что в свою очередь приводит к неэффективному расходованию ресурсов.

Также существует еще ряд проблем интеграции концепции «бережливого производства» в СМК:

- рассмотрение концепции «Бережливого производства» и СМК как отдельных систем управления предприятием;
- низкая вовлеченность руководства;
- восприятие концепции «бережливого производства» как набора инструментов, а не способа мышления;
- отсутствие квалифицированных специалистов, знающих требования, методы и инструменты как концепции «бережливого производства», так и СМК;
- внедрение концепции «бережливого производства» по «шаблону» без адаптации.

Для преодоления этих препятствий необходимо создание единой теоретической и методологической базы, которая позволит не только адаптировать опыт мировых лидеров в области бережливого производства, но и учесть специфику белорусских предприятий.

Необходимость разработки целостной и адаптированной к реалиям белорусской экономики модели интеграции концепции «бережливого производства» в СМК становится все более актуальной и острой. Разнообразие подходов и мето-

дов, используемых в различных отраслях, требует глубокого анализа и системного подхода, чтобы выработать стратегию, способную учитывать специфику и потребности каждого предприятия.

Внедрение системного подхода, основанного на анализе данных, обучении сотрудников и постоянном улучшении процессов, может существенно повысить эффективность производственной деятельности.

В докладе представлен алгоритм внедрения концепции «бережливого производства» в рамках СМК, состоящий из следующих этапов:

- 1) разработка и внедрение функциональной модели сети процессов СМК;
- 2) разработка и внедрение системы мотивации вовлеченности специалистов организации;
- 3) анализ рисков процессов СМК и уязвимости ресурсов, которые вызывают производственные потери;
- 4) разработка критериев эффективности каждой категории процессов СМК с точки зрения «бережливости» и создания ценности;
- 5) разработка типового алгоритма поиска источников потерь разных категорий процессов СМК;
- 6) выбор и обоснование инструментов концепции «бережливого производства» приемлемых для каждого процесса СМК.
- 7) разработка методик по практическому внедрению инструментов «бережливого производства» в производственные процессы производства.
- 8) разработка алгоритма анализа СМК с акцентом на улучшение качества и сокращения издержек.

Литература

1. СТБ ISO 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.
2. СТБ ISO 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования.
3. ГОСТ Р 56404-2015. Бережливое производство. Требования к системам менеджмента.
4. Отрасли промышленности стран мира [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://visasam.ru/emigration/economy/promyshlennost-stran-mira.html>.
5. Бакшеев, С. Л. Теоретические аспекты бережливого производства / С. Л. Бакшеев // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки, 2019. – С. 227–230.
6. Бережливое производство: учебное пособие / С. С. Серебренников [и др.]. – СПб: Питер, 2023. – 224с.

УДК 006.91

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРОВ (ИНДИКАТОРОВ)

Цитович Б. В.¹, Соломахо В. Л.²

¹Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Достаточно часто пользователи, используя детекторы (индикаторы) предполагают, что в силу специфического круга решаемых задач у таких технических средств не нормируются метрологические характеристики. Рассмотрены случаи, при которых осуществляется нормирование метрологических характеристик детекторов (индикаторов).

Ключевые слова: индикатор, детектор, измерительные задачи, метрологические характеристики.

METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF DETECTORS (INDICATORS)

Tsitovich B.¹, Solomakho V.²

¹Belarusian State Institute of Standardisation and Certification

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Annotation. Quite often users applying detectors (indicators) assume that due to the specific range of solved tasks such technical means do not have standardised metrological characteristics. The cases in which metrological characteristics of detectors (indicators) of normalization are considered.

Key words: indicator, detector, measuring tasks, metrological characteristics.

Адрес для переписки: Соломахо В. Л., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: vsolo@bntu.by

Детектор – «техническое средство или вещество, которое указывает на наличие определенного свойства объекта измерения при превышении порогового значения соответствующей величиной» [1]. В предыдущей версии документа был термин «индикатор» (indicator от лат. indico – указывать), в то время как «детектор» (от лат. detego – обнаруживаю) каждый из терминов отражает часть функционального назначения устройства, поскольку эффект следует обнаружить и зафиксировать обнаружение.

В технической литературе и учебной литературе [2] встречается другое определение индикатора: прибор, устройство, информационная система, элемент, отображающие ход процесса или состояние объекта наблюдения, его качественные либо количественные характеристики в форме, удобной для восприятия человеком.

Практическое применение индикации мы осуществляем при использовании таких, например, мер, как температурные краски, «капсулы тройной точки воды» и другие меры для температурных шкал. Индикация осуществляется при контроле размера изделия предельным калибром (проходным или непроходным). Контроль размера изделия нормальным калибром тоже относиться к индикации, но в этом случае на точность существенно влияет опыт оператора.

Очевидно, что индикатор не обязательно является средством измерений. Но в случае, когда в ходе наблюдений формируются количественные оценки, индикатор (в соответствии с РМГ – 29) выступает в качестве средства измерений, и имеет

нормированные (установленные) метрологические характеристики.

Большинство измерительных приборов могут использоваться для индикации, причем некоторые из них снабжают специальными дублирующими устройствами - сигнализаторами (световыми, звуковыми и др.). При поверке таких СИ следует уделять внимание их особенностям, присущим только индикаторам.

С нашей точки зрения, ничем не подтвержденное сегодня представление о том, что СИ, переведенные в разряд индикаторов, можно не поверять, будет категорической ошибкой для СИ, используемых в сфере законодательной метрологии.

Для таких СИ необходимо дать ответы на ряд вопросов, связанных с нормированием и контролем их метрологических характеристик. Очевидно, что для них следует устанавливать некие наборы метрологических характеристик, подтверждение которых осуществляется в ходе поверки. В результате возникают задачи метрологического обеспечения индикатора, которые включают:

- выбор и назначение необходимого и достаточного минимума метрологических характеристик;
- разработку методики поверки.

Исходная номенклатура метрологических характеристик СИ может изменяться при их использовании в качестве индикаторов, поскольку они не только измеряют физическую величину, но и обеспечивают заключение о ее соответствии нормированному предельному значению. В частности, некоторые МХ могут исключаться, а исходная номенклатура может дополняться специфиче-

скими характеристиками. Корректная постановка задач выбора и назначения метрологических характеристик индикатора должна опираться на анализ решаемых ими измерительных задач.

Оценка превышения исследуемой величиной порогового значения), сводятся к задачам двух типов:

- оценка превышения нулевого порогового значения;
- оценка превышения любого порогового значения отличного от нулевого.

Решение задач первого типа связано с требованиями недопущения определенных состояний объектов, например, отсутствие протечек вещества из системы.

Возможные решения типовых задач индикации схематически представлены на рисунке 1.

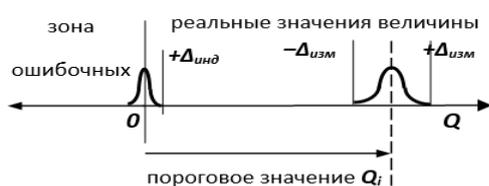


Рисунок 1 – Типовые схемы индикации

Если индикатор используют для контроля возможного превышения нулевого порогового значения, то экспериментальное оценивание величины выполняется с погрешностью, соответствующей положительному значению порога чувствительности в нулевой точке $+\Delta_{инд}$. Отрицательное значение порога чувствительности не имеет физического смысла, поскольку приводит результат индикации в зону ошибочных оценок.

В таком случае вместо погрешности СИ следует нормировать модуль порога чувствительности СИ в области нулевого значения измеряемой величины.

Сегодня для индикаторов, используемых как средства измерений нулевого порогового значения величины, метрологические характеристики не нормируются, а часто даже не упоминаются. Эта ситуация требует нормативного разрешения, в особенности для СИ, используемых в сфере законодательной метрологии.

При индикации любого назначенного не нулевого порогового значения физической величины измерительная задача близка к традиционной. В этой ситуации индикаторами являются собственно СИ, имеющие установленные метрологические характеристики, которые контролируют при поверке.

Главными МХ, определяющими точность индикации в области не нулевых значений величины, являются погрешности СИ, поскольку порог чувствительности является лишь одной из составляющих его погрешности.

Индикация является частным случаем измерительного контроля. Контроль и индикация кроме измерения величины предполагают сопоставление полученного значения с нормами и заключение о годности при контроле или заключение о выходе за пороговое значение при индикации.

Погрешности индикации, как и погрешности измерений кроме инструментальных включают в себя и другие составляющие, связанные с условиями измерений, выбором и реализацией метода измерений, а также субъективные составляющие погрешностей.

Поверка СИ является средством профилактики избыточных инструментальных погрешностей, поэтому ее следует считать обязательным условием применения индикаторов в сфере законодательной метрологии. Методику поверки традиционных СИ, используемых в качестве индикаторов, следует анализировать с учетом особенностей применения индикаторов.

Из представленного анализа следует, что для обеспечения единства измерений в ходе индикации необходимо обеспечить поверку применяемых специфических средств измерений (индикаторов) с грамотным нормированием и контролем метрологических характеристик, в особенности норм точности.

Литература

5. РМГ 29–2013. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения.
6. Михеев, В. П. Датчики и детекторы: Учебное пособие / В. П. Михеев, А. В. Просандеев. – М.: МИФИ, – 2007. – 172 с.

Секция 3. ФИЗИЧЕСКИЕ, ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ, МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

UDC 517.958

CLASSICAL SOLUTION OF A MIXED PROBLEM OF THE LONGITUDINAL IMPACT ON A FINITE ROD WITH A NONCHARACTERISTIC BOUNDARY CONDITION

Korzyuk V.^{1,2}, Rudzko J.², Kolyachko V.²

¹Belarusian State University

²Institute of Mathematics of the NAS of Belarus

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. We consider a mixed problem for the wave equation with discontinuous initial conditions and a noncharacteristic boundary condition. This problem models a longitudinal impact on the free end of a finite rod of constant cross-section. We seek a classical solution for the problem under consideration and establish conditions for its existence and uniqueness.

Key words: classical solution, mixed problem, wave equation, matching conditions, conjugation conditions.

КЛАССИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ СМЕШАННОЙ ЗАДАЧИ О ПРОДОЛЬНОМ УДАРЕ ПО КОНЕЧНОМУ СТЕРЖНЮ С НЕХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИМ ГРАНИЧНЫМ УСЛОВИЕМ

Корзюк В. И.^{1,2}, Рудзько Я. В.², Колячко В. В.²

¹Белорусский государственный университет

²Институт математики НАН Беларуси

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассматривается смешанная задача для волнового уравнения с разрывными начальными условиями и нехарактеристическим граничным условием. Эта задача моделирует продольный удар по свободному концу конечного стержня постоянного поперечного сечения. Отыскивается классическое решение рассматриваемой задачи и устанавливаются условия его существования и единственности.

Ключевые слова: классическое решение, смешанная задача, волновое уравнение, условия согласования, условия сопряжения.

Correspondence address: Rudzko J., 11 Surganov Street, Minsk 220072, Republic of Belarus

e-mail: janycz@yahoo.com

In this report, we consider the following boundary wave problem

$$\begin{aligned} (\partial_t^2 - a^2 \partial_x^2)u(t, x) &= f(t, x), \\ t > 0, x \in (\gamma(t), l), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} u(0, x) &= \varphi(x), \partial_t u(0, x) = \psi(x) - \\ & - \begin{cases} 0, & x \in [0, l), \\ v, & x = l, \end{cases} \quad x \in [0, l], \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \alpha(t) \partial_t u(t, \gamma(t)) + \beta(t) \partial_x u(t, \gamma(t)) + \\ + \theta(t) u(t, \gamma(t)) = \mu_1(t), t \in [0, \infty), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \partial_t^2 u(t, x = l) + \lambda \partial_x u(t, x = l) = \\ = \mu_2(t), t \in [0, \infty), \end{aligned} \quad (4)$$

where $\gamma(0) = 0$, $\gamma'(t) \in (-a, a)$, $t \in [0, \infty)$, the curves $x = \gamma(t)$ and $x = l$ do not intersect, the boundary condition (3) is nowhere characteristic, i.e., $\alpha(t) \neq a^{-1} \beta(t)$, $t \in [0, \infty)$.

The mixed problem (1)–(4) models of displacement $u(t, x)$ of the cross sections of the rod, which is subjected at the initial moment $t = 0$ to an impact on the free end $x = l$ by a load that sticks to the rod, where l is the initial length of the rod, v is the velocity of the impacting load, $a = \sqrt{E\rho^{-1}}$, and $\lambda = SEM^{-1}$,

where $E > 0$ is Young's modulus of the rod material, $\rho > 0$ is the density of the rod material, $S > 0$ is the cross-sectional area of the rod, $M > 0$ is the mass of the impacting load. The boundary condition (3) models different ways of fixing the end $x = \gamma(t)$ of the rod, e. g., if we assume $\alpha(t) = Sp\gamma'(t)$, $\beta = SE$, and $\theta \equiv 0$, then we obtain the free end [1–3].

Let us introduce the functions

$$\begin{aligned} \gamma_+ : [0, \infty) \ni t \mapsto \gamma(t) + at, \\ \gamma_- : (-\infty, 0] \ni t \mapsto \gamma(t) - at, \end{aligned}$$

and let the functions Φ_+ and Φ_- are the inverses of the functions γ_+ and γ_- , respectively. Assertions 1 and 2 of the paper [4] guarantee the existence of the functions Φ_+ and Φ_- .

To solve the problem (1)–(4), we divide the domain

$$Q = \{(t, x) : t \in (0, \infty) \wedge x \in (\gamma(t), l)\},$$

by the characteristics $x - at = \gamma_-(r_i)$ and $x + at = l + al_i$, $i \in \{0\} \cup \mathbb{N}$, into subdomains $Q^{(i,j)}$:

$$\begin{aligned} Q^{(0,0)} &= Q \cap \\ & \cap \{(t, x) : x - at \in [0, l] \wedge x + at \in [0, l]\}, \\ Q^{(1,0)} &= Q \cap \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \cap \{(t, x) : x - at \in [\gamma_-(r_1), 0] \wedge x + at \in [0, l]\}, \\ & \quad Q^{(0,1)} = Q \cap \\ & \cap \{(t, x) : x - at \in [0, l] \wedge x + at \in [l, l + al_1]\}, \\ & \quad Q^{(i,j)} = Q \cap \\ & \cap \{(t, x) : x - at \in [\gamma_-(r_i), \gamma_-(r_{i-1})] \wedge \\ & \wedge x + at \in [l + al_{j-1}, l + al_j]\}, i \in \mathbb{N}, j \in \mathbb{N}, \\ & \text{where } r_0 = l_0 = 0, l_i = r_{i-1} + a^{-1}(l - \gamma(r_{i-1})), \\ & \quad r_i = \Phi_+(l + al_{i-1}), i \in \mathbb{N}. \end{aligned}$$

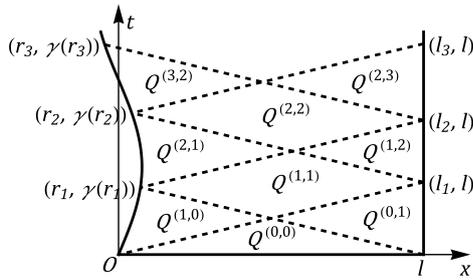


Figure 1 – Partitioning of the domain Q

Definition 1. A function u is a classical solution of the problem (1)–(4) if it is representable in the form $u = u_1 + u_2$, where u_1 is a classical solution of the problem (1)–(4) with $v = 0$ and u_2 satisfies Eq. (1) with $f \equiv 0$, the initial conditions

$$u_2(0, x) = \partial_t u_2(0, x) = 0, x \in [0, l], \quad (5)$$

the boundary conditions (3) and (4) with $\mu_1 = \mu_2 \equiv 0$, and the following matching conditions:

$$\begin{aligned} [(u_2)^+ - (u_2)^-](t, x = \gamma_-(r_i) + at) &= 0, \\ i \in \{0\} \cup \mathbb{N}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} [(u_2)^+ - (u_2)^-](t, x = l + al_i - at) &= 0, \\ i \in \{0\} \cup \mathbb{N}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} [(\partial_t u_2)^+ - (\partial_t u_2)^-](t, x = l + al_i - at) &= \\ = \begin{cases} 0, i \equiv 0 \pmod{2}, \\ -v, i \equiv 1 \pmod{2}, \end{cases} i \in \{0\} \cup \mathbb{N}. \end{aligned} \quad (8)$$

Here $(\cdot)^\pm$ are the limit values of the function u and its partial derivatives on different sides on the characteristic $x = r(t)$, i.e.,

$$(\partial_t^p u)^\pm(t, r(t)) = \lim_{\delta \rightarrow 0^+} \partial_t^p u(t, r(t) \pm \delta).$$

The conditions (6) and (7) follow from the continuity, and the condition (8) is derived from the physical assumptions [5]. Note that Definition 1 gives a physically correct solution only under the additional condition $\gamma'(r_{2i-1}) = 0, i \in \mathbb{N}$.

Theorem 1. Let the smoothness conditions $f \in C^1(\bar{Q})$, $\varphi \in C^2([0, l])$, $\psi \in C^1([0, l])$, $\mu_1 \in C^1([0, \infty))$, $\mu_2 \in C([0, \infty))$, $\gamma \in C^2([0, \infty))$, $\alpha \in C^1([0, \infty))$, $\beta \in C^1([0, \infty))$, $\theta \in C^1([0, \infty))$, be

satisfied. The mixed problem (1) – (4) has a unique classical solution u in the sense of Definition 1 if and only if the following conditions are satisfied:

$$\begin{aligned} \mu_1(0) &= \alpha(0)\psi(0) + \beta(0)\varphi'(0) + \theta(0)\varphi(0), \\ \mu_1'(0) &= \alpha'(0)\psi(0) + \beta'(0)\varphi'(0) + \theta'(0)\varphi(0) + \\ &+ \theta(0)(\psi(0) + \gamma'(0)\varphi'(0)) + \\ &+ \alpha(0)(f(0,0) + \gamma'(0)\psi'(0) + a^2\varphi''(0)) + \\ &+ \beta(0)(\psi'(0) + \gamma'(0)\varphi''(0)), \\ \mu_2(0) &= f(0, l) + a^2\varphi''(l) + \lambda\varphi'(l). \end{aligned}$$

The results obtained in this report generalize and extend the previously known theorems [6–11].

Acknowledgments. The report was published with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the program of the Moscow Center of Fundamental and Applied Mathematics under the agreement № 075-15-2022-284.

References

1. Vesnitsky, A. I. Waves in systems with moving boundaries and loads / A. I. Vesnitsky. – M.: Fizmatlit, 2001. – 320 p.
2. Anisimov, V. N. Mathematical models of nonlinear longitudinal-cross oscillations of object with moving borders / V. N. Anisimov, V. L. Litvinov // J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. & Math. Sci. – 2015. – V. 19, № 2. – P. 382–397.
3. Anisimov, V. N. Longitudinal resonant oscillations of a viscoelastic rope of a lifting equipment / V. N. Anisimov // Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Federation Academy of Sciences. – 2016. – V. 18, № 4. – P. 128–133.
4. Korzyuk, V. I. Classical Solution of the First Mixed Problem for the Telegraph Equation with a Nonlinear Potential in a Curvilinear Quadrant / V. I. Korzyuk, J. V. Rudzko // Differential Equations. – 2023. – V. 59, № 8. – P. 1075–1089.
5. Korzyuk, V. I. Solutions of problems with discontinuous conditions for the wave equation / V. I. Korzyuk, J. V. Rudzko, V. V. Kolyachko // Journal of the Belarusian State University. Mathematics and Informatics. – 2023. – V. 3. – P. 6–18.
6. Korzyuk, V. I. Classical Solution of the First Mixed Problem for Second-Order Hyperbolic Equation in Curvilinear Half-Strip with Variable Coefficients / V. I. Korzyuk, I. I. Stolyarchuk // Differential Equations. – 2017. – V. 53, № 1. – P. 74–85.
7. Korzyuk, V. I. Classical Solution of the First Mixed Problem for the Wave Equation in a Curvilinear Half-Strip / V. I. Korzyuk, I. S. Kozlovskaya, S. N. Naumavets // Differential Equations. – 2020. – V. 56, № 1. – P. 98–108.
8. Korzyuk, V. I. A mathematical investigation of one problem of the longitudinal impact on an elastic rod with an elastic attachment at the end / V. I. Korzyuk, J. V. Rudzko // Tr. Inst. Mat., Minsk. – 2023 – V. 31, № 1. – P. 81–87.
9. Gaiduk, S. I. Some problems related to the theory of longitudinal impact on a rod / S. I. Gaiduk // Differential Equations. – 1977. – V. 12. – P. 607–617.

10. Baranovskaya, S. N. Directional Derivative Problem for the Telegraph Equation with a Dirac Potential / S. N. Baranovskaya, E. N. Novikov, N. I. Yurchuk // Differential Equations. – 2018. – V. 54, № 9. – P. 1147–1155.

11. Baranovskaya, S. N. Mixed problem for the string vibration equation with a time-dependent oblique derivative in the boundary condition / S. N. Baranovskaya, N. I. Yurchuk // Differential Equations. – 2009. – V. 45, № 8. – P. 1212–1215.

УДК 681.723.2

ЛАЗЕРНЫЙ МИКРОСКОП ДЛЯ ВИДЕОРЕГИСТРАЦИИ СТРУКТУРЫ BLU-RAY ДИСКА

Агашков А. В.

ГНУ «Институт физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлен микроскоп с лазерной системой освещения, обеспечивающий качественную видеорегистрацию структуры Blu-ray диска при его поперечных перемещениях. Видеорегистрация производилась на длинах волн излучения 405, 532 и 632,8 нм без удаления защитного слоя. Для формирования изображения использован стандартный объектив ЛОМО МИ 90x/1,25, иммерсионная жидкость – дистиллированная вода. Параметры оптической системы позволяют получать изображение с высоким поперечным разрешением без повреждения диска.

Ключевые слова: микроскопия, косое освещение, видеорегистрация структуры, Blu-ray диск с фильмом.

LASER MICROSCOPE FOR VIDEO REGISTRATION OF BLU-RAY DISC STRUCTURE

Agashkov A.

Institute of Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. We present a microscope with a laser illumination system, it provides qualitative video recording of the Blu-ray disc structure during its transverse movements. Video recording was performed at wavelengths of 405, 532 and 632.8 nm without removing the protective layer. A standard LOMO MI 90x/1.25 lens was used to form the image, and the immersion liquid was distilled water. The parameters of the optical system make it possible to obtain an image with high transverse resolution without damaging the disc.

Key words: microscopy, oblique illumination, video recording of structure, Blu-ray movie disc.

Адрес для переписки: Агашков А. В., пр. Независимости, 68-2, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: a.agashkov@ifanbel.bas-net.by

Введение. Оптические микроскопы дальнего поля являются очень эффективными устройствами для получения изображения структуры объектов с поперечным разрешением порядка 200 нм. Основным ограничением оптической микроскопии является предельное разрешение, в соответствии с теорией Аббе определяемое выражением

$$r = \lambda_0 / 2n \sin \theta = \lambda_0 / 2NA, \quad (1)$$

где λ_0 – длина волны света в вакууме; n – показатель преломления среды между объектом и объективом; θ – половинный угол наиболее наклонных лучей, попадающих в объектив; NA – числовая апертура объектива. При более детальном рассмотрении необходимо также учитывать состояние поляризации и степень когерентности световой волны, а также параметры конденсора [1].

Для улучшения пространственного разрешения микроскопов был предложен метод, в соответствии с которым вплотную к исследуемой поверхности размещались микролинзы [2]. Исследования в данном направлении продолжают по настоящее время. В большинстве случаев в качестве тестовых объектов используются Blu-ray диски (BD) с периодом 320 нм. К недостаткам микроскопов с микролинзами можно отнести

необходимость предварительного удаления защитного слоя BD толщиной 100 мкм, ограничение области исследуемой поверхности размерами микролинз, малая информативность – на полученных изображениях видны только треки без записанных данных. Использование микроволокон [3] позволило увеличить только размер исследуемой области в одном направлении.

Применение дополнительной твердой иммерсионной линзы, контактирующей с поверхностью защитного слоя, увеличило числовую апертуру объектива микроскопа до значения $NA = 1,4$ для длины волны света 405 нм. В режиме критического освещения это позволило зарегистрировать пикеты данных [4]. Недостатками данной системы является отсутствие мобильности в выборе регистрируемой области поверхности диска и возможное повреждение его защитного слоя.

В работе [5] представлен проекционный микроскоп с лазерной системой освещения, характеризующийся высокой яркостью и контрастностью изображения субмикронных объектов.

Цель данной работы – экспериментальное подтверждение перспективности использования модификации данного микроскопа по методу косого освещения для мобильной регистрации структуры BD.

Экспериментальная установка. В качестве тестового объекта выбран Blu-ray диск с фильмом (BD-R). Для формирования изображения на фотоматрице цифровой камеры Nikon D5300 использован стандартный объектив ЛОМО МИ 90х/1,25, иммерсионная жидкость – дистиллированная вода. Как было установлено ранее [5], применение окуляра микроскопа и/или объектива фотокамеры нецелесообразно, вследствие сильного проявления эффекта колец Ньютона. Для коррекции масштаба изображения использованы линзы с фокусным расстоянием $f = -0,33, 0,5, 0,75$ и 1 м. Отрицательные линзы увеличивают, а положительные линзы уменьшают масштаб изображения. Система освещения основана на вращающемся микролинзовом растре, гексагональная упаковка, диаметр микролинз $100 \mu\text{m}$, относительное отверстие раstra $1 : 5,6$. В качестве источника освещения использованы лазеры с длинами волн излучения $405, 532$ и $632,8$ нм.

Основные результаты. На рисунке 1 представлены кадры видеозаписи с лазером на длине волны излучения 405 (а) и $632,8$ нм (б).

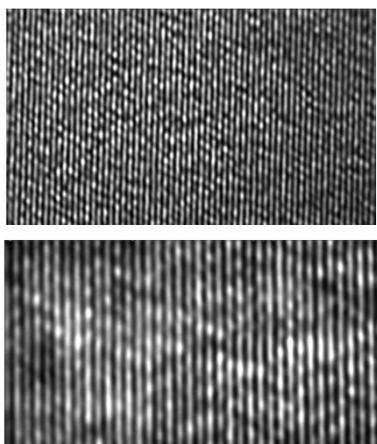


Рисунок 1 – Область данных Blu-ray диск с фильмом: а – без корректирующей линзы; б – корректирующая линза с $f = -0,33$ м

Сканирование поверхности BD-R выявило не только различные области с питами данных (рисунок 2), но и область со специфической структурой, не описанной ранее (рисунок 3), $\lambda = 405$ нм.

Как видно из рисунков 1, 2, при записи данного диска использована технология «low-to-high» (BD-R L2H), формат треков – «On-Groove». AFM-изображение записанных по данной технологии битов информации представлено в работе [6].

Успешная видеозапись реализована при мощностях лазеров на входе оптической системы

20 мВт (405 нм), 1 мВт (532 нм) и 4 мВт ($632,8$ нм).

Таким образом, представлен микроскоп с лазерной системой освещения, характеризующийся высокой яркостью и контрастностью изображения структуры Blu-ray диска. Предлагаемая оптическая система позволяет производить оперативный контроль различных участков поверхности. Применение дистиллированной воды в качестве дисперсионной жидкости и отсутствие контакта оптических элементов с поверхностью Blu-ray диска обеспечивают высокую защиту от случайных повреждений.

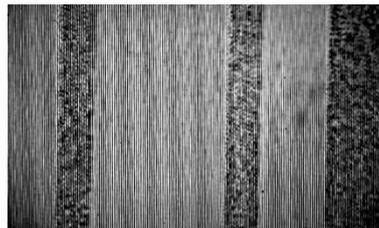


Рисунок 2 – Области с питами данных: корректирующая линза с $f = 0,5$ м

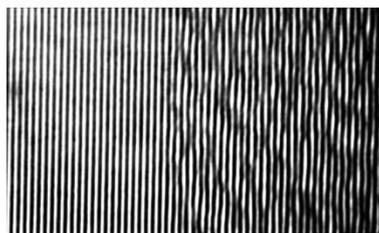


Рисунок 3 – Область с неустановленной структурой: слева – треки без записи, справа – структура

Литература

1. Darafsheh, A. Microsphere-assisted microscopy / A. Darafsheh // J. Appl. Phys. – 2022. – V. 131. – P. 1–26.
2. Optical virtual imaging at 50 nm lateral resolution with a white-light nanoscope / Z. Wang [et al.] // Nature Communications. – 2011. – V. 2, 218. – P. 1–6.
3. Nolvi, A. Wide field of view 3D label-free super-resolution imaging / A. Nolvi [et al.] // Proc. SPIE. – 2018. – V. 10539, 1053912. – P. 1–9.
4. Densmore, V. A high-NA solid immersion objective for imaging a Blue-ray disc and investigating subsurface damage / V. Densmore [et al.] // Proc. SPIE. – 2014. – V. 92010Q. – P. 1–6.
5. Агашков, А. В. Лазерный микроскоп с субмикронным разрешением / А. В. Агашков // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2015. – № 1. – С. 17–24.
6. Chen, S.-H. Measurement of edge verticality of optical recording bits on blu-ray discs using scanning probe microscopy / S. -H. Chen, W. -S. Lin, W. -C. Wang // Microscopy research and technique. – 2010. – V. 73, №. 1.

ЦВЕТОВАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ В РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА**Балухо И. Н., Дудчик Ю. И., Кольчевский Н. Н.***НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь»*

Аннотация. Предложена создание цветных рентгеновских изображений на основе применения широкополосных рентгеновских источников. Разработано программное обеспечение «X-ray-RGB-tube» по формированию цветных рентгеновских спектров. Выполнены численные моделирование по формированию белого источника и получения цветных спектров в рентгеновском диапазоне длин волн.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, цветовая визуализация, рентгеновские спектры.

COLOR IMAGING IN THE X-RAY SPECTRUM RANGE**Balukho I., Dudchik Y., Kolchevsky N.***¹A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems BSU
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Proposed the creation of color X-ray images based on the use of broadband X-ray sources. Developed software “X-ray-RGB-tube” for the formation of color X-ray spectra. Performed numerical simulations on the formation of a white source and obtaining color spectra in the X-ray wavelength range.

Key words: X-ray, color imaging, X-ray spectra.

*Адрес для переписки: Кольчевский Н. Н., ул. Курчатова 7–403, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: kolchevsky@bsu.by*

Создание и разработка функционально новых, усовершенствованных и уникальных объектов рентгенооптических систем связано с широким развитием направлений исследований в области рентгеновской физики. Экспериментальные изображения в рентгеновских исследованиях представляются в виде монохромных изображений, из чего также возникает задача по «раскраске» рентгеновских изображений, для визуализации и получения информации об изображении и объекте. Известны патенты предлагающие различные модификации рентгеновских трубок, рентгенооптических компонентов, детекторов и многие другие способы формирования рентгеновского цветных изображений на основе рентгеновских экспериментальных данных. Метод генерирования рентгеновского цветного изображения включает выбор трех наборов рентгеновских изображений в градации серого, полученных с помощью рентгеновских лучей, имеющих различные энергетические спектры, присвоение базовых цветов RGB этим трем наборам и отображение рентгеновского цветного изображения с помощью генерируемых сигналов RGB [1].

В работе рассматривается идея создания цветных рентгеновских изображений на основе применения широкополосных рентгеновских источников [2].

Широкополосный источник рентгеновского излучения может представлять собой источник со сложным анодом или источник, который состоит

из нескольких источников: параллельных, которые одновременно облучают объект в эксперименте; последовательных, которые будут представлять собой послойное облучение, в результате которого и будет формироваться широкополосный источник. Как для источника со сложным анодом, так и нескольких источников, формирование спектра широкополосного источника представляет собой суммирование спектров (1).

$$\Delta I(\lambda) = \sum_i k_i \cdot \frac{(\lambda - \lambda_i)}{\lambda 3_i}, \quad (1)$$

Таким образом, суммируя спектральные интенсивности, происходит смешения интенсивностей. Широкополосный источник рентгеновского излучения, с точки зрения цветовой рентгенографии, представляет собой «белый» источник. Следовательно, формирование широкополосного источника заключается в смешении интенсивностей таким образом, чтобы в результате получения интегрального цвета он был «белым» и интенсивность спектра была равномерной.

Ширина спектра i -того источника представляет собой следующую зависимость:

$$\Delta E_{12} = \Delta y_{12} E_0, \\ \frac{E_1}{E_{01}} = y_1 \frac{E_2}{E_{01}} = y_2, \quad (2)$$

где E_{01} – задаваемое начальное значение энергии для построения спектра, равное 100 кэВ.

В результате преобразований формул (1) и (2) получаем следующее уравнение:

$$\left(\frac{E}{E_0}\right)^3 - \left(\frac{E}{E_0}\right)^2 + \frac{4X}{27} = 0, \quad (3)$$

где X – параметр, определяющий допуск на однородность спектра.

Для заданного источника параметр X определяет полосу энергий $[E_1; E_2]$, которая формирует результирующий спектр. Решение данного уравнения, заданное формулой (3), позволяет рассчитать многофокусный рентгеновский источник с широкополосным спектром (рисунок 1).

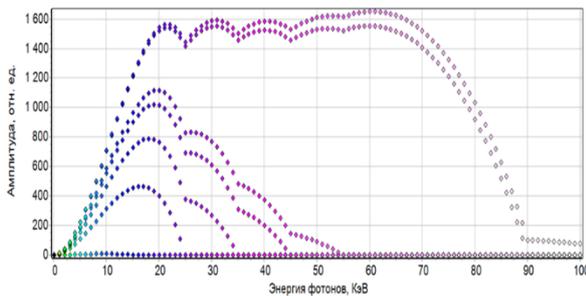


Рисунок 1 – Широкополосный источник рентгеновского излучения

Цветные изображения объектов формируются в зависимости от спектра рентгеновского излучения. На основе метода разработана и создана программа «X-ray-RGB-tube» [2]. Для цветовой визуализации рентгеновского спектра и анализа спектра рентгеновского источника, каждой энергии спектра сопоставляется RGB вектор, который представляет собой значение интенсивности красного, зеленого и голубого цвета:

$$(RX_1, GX_2, BX_3), \quad (4)$$

где RX_1, GX_2, BX_3 – числа из диапазона от 0 до 255.

Диапазон энергий для рентгеновского излучения составляет от 0,1 КэВ до 100 КэВ. Преобразуем диапазон по формуле:

$$\begin{aligned} \min: \log_{10}(\text{КэВ}), \\ \max: 3 + \log_{10}(\text{КэВ}) \end{aligned} \quad (5)$$

Далее задаем цветовую гамму для спектра. Зная диапазон энергий, необходимо разбить его на интервалы, которые будут описывать номер цвета в соответствии с интервалом. Всего интервалов будет 7, в соответствии с цветами радуги (оптическим спектром): Красный, Оранжевый, Желтый, Зеленый, Голубой, Синий, Фиолетовый. Минимальные значения RGB вектора, выходящие за диапазон, будут приниматься за черный цвет, а максимальные – за белый.

Так как в раскладке RGB оранжевый цвет является смешением красного и желтого (оттенком), то основные интервалы будут выглядеть следующим образом (таблица 1).

Таблица 1 – RGB вектора цветов

Цвет	RX_1	GX_2	BX_3
Черный	0	0	0
Красный	255	0	0
Желтый	255	255	0
Зеленый	0	255	0
Голубой	0	255	255
Синий	0	0	255
Фиолетовый	255	0	255
Белый	255	255	255

Как видно из таблицы, при переходе от одного цвета к другому изменяется определенная координата RGB. Таким образом число шагов по оттенку составляет 255. Разбив энергетический диапазон рентгеновского излучения на интервалы в соответствии с переходами от цвета к цвету, получим граничные значения энергии, которые и будут сортировать спектральные линии по цветам (таблица 2):

Таблица 2 – Цветовые интервалы и их граничные энергии

Интервал	Переход	Энергия, КэВ
1	Ч-К	0,269
2	К-Ж	0,708
3	Ж-З	1,905
4	З-Г	5,129
5	Г-С	13,804
6	С-Ф	37,153
7	Ф-Б	100

Таким образом будет реализовываться алгоритм, при котором будет передаваться номер интервала и в зависимости от него идти расчет цвета. Как итог на выходе программы получаем цветное отображение графика спектральной интенсивности тормозного спектра. При различных значениях энергии тормозной спектр будет иметь радужную окраску.

При использовании такого принципа раскраски спектра, возможна реализации по получению цветных изображений на детекторе. Детектор воспринимает излучение от объекта в широком спектре, в результате видит цветную картинку, которая соответствует смещению всех цветов спектра в каждом пикселе, соответственно мы получаем цветное изображение объекта.

Благодарности. Работа частично поддержана Министерством образования Республики Беларусь в рамках задания 3.12 ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», подпрограмма «Техническая диагностика».

Литература

- X-ray System And Method For Generating X-ray Image In Color // 11,116,462US Patent. – 2021 г.
- Balukho, I. N. Colour visualization method of X-Ray spectra / I. N. Balukho, Y. I. Dudchik, N. N. Kolchevsky // Приборостроение–2023: материалы 16 Международной научно-технической конференции, 15–17 ноября 2023 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2023. – С. 187–189.

УДК 535.3

ИЗМЕРЕНИЕ РАЗМЕРОВ МИКРОЧАСТИЦ ПО УГЛОВОМУ РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ИНТЕНСИВНОСТИ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Бобученко Д. С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрены различные методы определения размеров микрочастиц, показана возможность использовать для этих целей измерение углового распределения интенсивности рассеянного излучения.

Ключевые слова: индикатриса излучения, ситовый анализ, седиментационный анализ, метрический метод, статический анализ рассеяния излучения.

MEASURING THE SIZE OF MICROPARTICLES BY THE ANGULAR DISTRIBUTION OF THE SCATTERED RADIATION INTENSITY

Babuchenka D.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Various methods for determining the size of microparticles are considered, and the possibility of using the measurement of the angular distribution of the intensity of scattered radiation for these purposes is shown.

Key words: radiation indicatrix, sieve analysis, sedimentation analysis, metric method, static analysis of radiation scattering.

*Адрес для переписки: Бобученко Д. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: dbobuchenko@gmail.com*

В повседневной жизни мы постоянно окружены различными микрочастицами. Они представляют собой взвешенные в газообразной среде (в воздухе) твердые (дым), жидкие частицы (туман), также кровь представляет собой суспензию в плазме и др. Они играют важную роль в различных сферах жизнедеятельности человека. Размеры частиц изменяются в широком диапазоне от нескольких нанометров до сотен микрон. В настоящее время существует большое число разнообразных методов определения размеров частиц. Рассмотрим основные из них.

Ситовый метод. В этом методе распределение частиц по размерам осуществляется просеиванием порошка через набор стандартных сит, в которых размер отверстий последовательно уменьшается сверху вниз, в результате чего просеянный материал разделяется на фракции по размерам [1]. Этот метод имеет ряд ограничений: 1. для проведения данного анализа требуется большое количество исследуемого материала; 2. данный метод не эффективен к нес्यпучим материалам, забивающим отверстия сита; 3. при проведении анализа следует контролировать температуру окружающей среды и влажность, если исследуемые образцы легко теряют влагу или наоборот гигроскопичны; 4. если используются материалы которые электризуются, то следует к образцу добавлять антистатик, который меняет состав и массу материала.

Седиментационный анализ и центрифугирование. Этот метод основан на зависимости скорости осаждения однородных частиц от их размеров. Грубодисперсные системы изучают методом

седиментации в гравитационном поле, а тонкодисперсные и коллоидно-дисперсные – методом седиментации в центрифуге. В вязкой и плотной среде при седиментации частица движется под действием силы тяжести в гравитационном поле. Сила сопротивления среды, действующая на сферическую частицу, зависит от ее размера, скорости движения, вязкости среды [1]. В центрифуге разделение веществ основано на разном поведении частиц в центробежном поле. Суспензию частиц, помещенную в пробирку, загружают в ротор, установленный на валу привода центрифуги. В центробежном поле частицы, имеющие разную плотность, форму и размеры, осаждаются с разной скоростью. Скорость седиментации зависит от центробежного ускорения, прямо пропорционального угловой скорости ротора и расстоянию между осью вращения и частицей.

Метрический метод с помощью электронной микроскопии. В этом методе размер частиц устанавливается по их изображениям, полученным с электронного микроскопа. На микроскопе можно определить размер частиц с разрешающей способностью при использовании детектора вторичных электронов от 0,003 мкм. Электронная микроскопия с анализом изображения позволяет определить не только мелкодисперсную фракцию менее 0,1 мкм, но и исследовать форму частиц порошкообразной смеси, что невозможно определить рассмотренными выше методами. Однако этот метод требует высокой квалификации персонала, подготовки материала для работы с микроскопом и последующей обработки результатов [1].

Кондуктометрический анализ. Это ряд методов основанных на измерении электропроводности материала [2]. Кондуктометрические методы подразделяются на прямые методы анализа (используемые, например, в солемерах) и косвенные методы (используемые в газовом анализе). Прямая кондуктометрия - это метод, непосредственного определения концентрации электролита путем измерения электропроводности раствора с известным качественным составом. Косвенные методы заключаются в определении содержания вещества по излому кривой титрования.

Метод динамического рассеяния света. Метод динамического рассеяния света используется для измерения размеров частиц порядка 10^{-9} м. Основная идея метода заключается в измерении флуктуаций рассеянного света при прохождении светового пучка через среду. Возникающие локальные флуктуации концентрации частиц в среде вследствие броуновского движения дисперсных частиц или макромолекул приводит к локальным неоднородностям показателя преломления. Вследствие чего при прохождении светового пучка через такие локальные неоднородности показателя преломления возникают флуктуации интенсивности рассеянного света. Измеряя время затухания экспоненциальной временной корреляционной функции рассеянного света с помощью цифрового коррелятора можно оценить коэффициент диффузии частиц, который обратно пропорционален времени релаксации флуктуаций интенсивности рассеянного света. Далее по формуле Стокса-Эйнштейна $D = \frac{kT}{6\pi\eta r}$, где D – коэффициент диффузии, k – постоянная Больцмана, T – температура, η – вязкость среды, можно определить размер частиц r (гидродинамический радиус) [3].

Метод статического анализа рассеяния света. Электромагнитная волна при взаимодействии с частицей аэрозоля преломляется, отражается и поглощается частицей, испытывает дифракцию. Угловое распределение интенсивности рассеянного излучения, называемое индикатрисой рассеяния, зависит от размера, формы, относительного показателя преломления, и может быть рассчитана по теории Ми [4]:

$$i(\theta) = \frac{1}{2} (|S_1(\theta)|^2 + |S_2(\theta)|^2),$$

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \{a_n \pi_n + b_n \tau_n\},$$

$$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \{a_n \tau_n + b_n \pi_n\}.$$

В этих формулах a_n , b_n – коэффициенты Ми, зависящие от функций Риккати – Бесселя и их производных. Аргументами этих функций являются: параметр дифракции $x = \frac{2\pi}{\lambda} r$ и относительный показатель преломления материала частицы. Угловые функции τ_n и π_n зависят от присоединных полиномов Лежандра и могут быть рассчитаны стандартными методами [4].

На рисунке представлены результаты расчетов индикатрисы рассеяния для водных сферических капель для различных параметров дифракции.

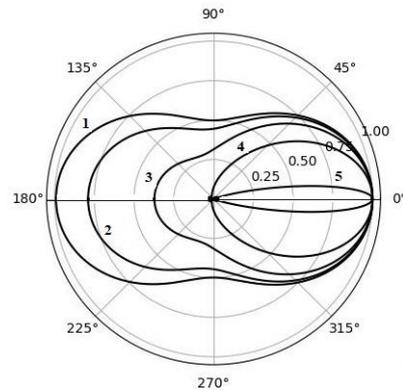


Рисунок 1 – Зависимость относительной интенсивности рассеянного излучения от угла рассеяния для параметра дифракции $x = 0,1$ (1); $0,5$ (2); $1,0$ (3); $2,0$ (4); $10,0$ (5)

Как следует из вычислений угловое распределение рассеянного излучения существенно зависит от размера частиц, и может лежать в основе определения радиусов частиц. Если размер частицы меньше длины волны падающего излучения, то оно рассеивается примерно одинаково под разными углами, и определение размеров частиц должно детектироваться под большими углами. Если радиус частицы больше, чем длина волны, то рассеяние происходит вперед, измерение распределения интенсивности излучения должно проводиться в прямом направлении для малых углов рассеяния.

Литература

1. Волков, В. А. Коллоидная химия. Поверхностные явления и дисперсные системы: учебники для вузов. СПб.: Спец. литература, 2015. – 660 с.
2. Брайнина, Х. З. Инверсионные электроаналитические методы / Х. З. Брайнина, Е. Я. Нейман, В. В. Слепушкин. – М.: Химия, 1988. – 239 с.
3. Казаков А. Н. Динамический анализ микроструктурных ориентировок минералов. – СПб.: Наука, 1987. – 272 с.
4. Борен, К. Поглощение и рассеяние света малыми частицами / К. Борен, Д. Р. Хафман. – М.: Мир, 1986. – 664 с.

УДК 621.317

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЧИСЛА ДИСКРЕТНЫХ ОТСЧЕТОВ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ СПЕКТРОФОТОМЕТРОВ

Богдан П. С., Зайцева Е. Г., Степаненко Д. А., Билейчик А. А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. На основании разработанной методики при измерении оптических спектров установлено, что при измерении спектра излучения RGB-SMD-светодиода с ростом числа дискретных отсчетов вначале происходит уменьшение среднеквадратичного отклонения между анализируемым и рассчитанным спектрами, затем его увеличение. Возможной причиной такого результата является наложение распределений спектрального пропускания после спектральных щелей монохроматора, имеющее место, когда число отсчетов превышает отношение общего измеряемого диапазона к ширине дискретного интервала.

Ключевые слова: дискретизация, оптический спектр излучения, спектрофотометр, спектральная щель монохроматора.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE NUMBER OF DISCRETE SAMPLES ON THE MEASUREMENT ERROR OF SPECTROPHOTOMETERS

Bogdan P., Zaytseva E., Stepanenko D., Bileichik A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. It found that when measuring the emission spectrum of RGB-SMD LEDs, with an increase in the number of discrete samples, the standard deviation between the analysed and calculated spectra decreases first, after that increases based on the developed technique for measuring optical spectra. A possible reason for this result is the overlap of spectral transmission distributions after the spectral slits of the monochromator, which occurs when the number of samples exceeds the ratio of the total measured range to the width of the discrete interval.

Key words: sampling, optical radiation spectrum, spectrophotometer, spectral slit of the monochromator.

*Адрес для переписки: Богдан П.С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: pbogdan@bntu.by*

Для повышения производительности процессорной обработки результатов измерений рационально создавать и использовать простые алгоритмы. При измерении спектрофотометрами интенсивности спектров оптического излучения их значения дискретизируются по длине волны. Целью исследований являлся анализ зависимости точности результатов измерения от количества отсчетов измерения по длине волны.

В качестве примера для анализа использовалось неравномерное по длине волны спектральное распределение $S(\lambda)$ излучения RGB-SMD-светодиода LM1-TPP1-01 TTQ [1] (рисунок 1). Спектр излучения нормировался приведением его площади к 1. На следующем этапе производилась равномерная по ширине выборка из значений интенсивностей спектра излучения (их количество при расчетах в программном пакете *MatLab* изменялось от 2 до 700) на отдельных длинах волн. На рисунке 2 в качестве примера графически показан итог для выборки из 10 значений.

Каждое дискретное значение длины волны является серединой интервала, внутри которого происходит усреднение результатов измерения. Так как спектральное пропускание внутри щели является неравномерным, в расчетах было принято, что зависимость пропускания от длины волны в данном случае имеет колоколообразную форму, описываемую

перевернутой квадратичной функцией. Очевидно, что ширина данного интервала влияет на точность измерений спектрофотометра. Ширина основания колокола была выбрана равной 10 нм, что превышает соответствующие значения для современных спектрофотометров, равные 1–6 нм [2].

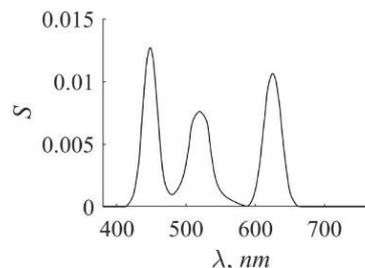


Рисунок 1 – График нормированного излучения $S(\lambda)$ RGB-SMD-светодиода LM1-TPP1-01 TTQ [1]

Графическое представление произведения спектра светового излучения на колоколообразные коэффициенты пропускания приведено на рисунке 3 для 10 отсчетов.

Так как чувствительный элемент спектрофотометра суммирует излучение за каждым интервалом пропускания, то значения интенсивности на светочувствительных элементах вычислялись интегрированием кривых под каждым графиком прошедшего через интервал излучения.

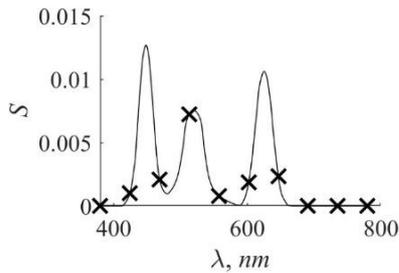


Рисунок 2 – График нормированного излучения $S(\lambda)$ RGB-SMD-светодиода LM1-TPP1-01 TTQ и выделенные крестиками значения 10 дискретных отсчетов

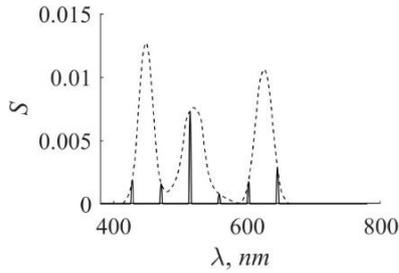


Рисунок 3 – Графики нормированного излучения $S(\lambda)$ RGB-SMD-светодиода LM1-TPP1-01 TTQ (пунктирная линия) и излучения, прошедшего через дискретные интервалы пропускания (сплошные линии) для 10 отсчетов

Результат такого интегрирования с учетом последующей линейной интерполяции и нормирования рассчитанного для 10 значений спектра $S'(\lambda)$ излучения представлен на рисунке 4.

Затем при изменении числа отсчетов от 2 до 700 было рассчитана графически представленная на рисунке 5 зависимость среднеквадратичного отклонения σ между анализируемым $S(\lambda)$ и рассчитанным $S'(\lambda)$ спектрами излучения в оптическом спектральном диапазоне от λ_{min} до λ_{max} по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \left(\frac{S(\lambda) - S'(\lambda)}{S(\lambda)} \right)^2 d\lambda}{\lambda_{max} - \lambda_{min}}}$$

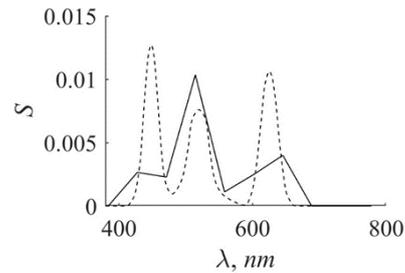


Рисунок 4 – Графики нормированного излучения $S(\lambda)$ RGB-SMD-светодиода (пунктирная линия) и рассчитанного спектра $S'(\lambda)$ (сплошная)

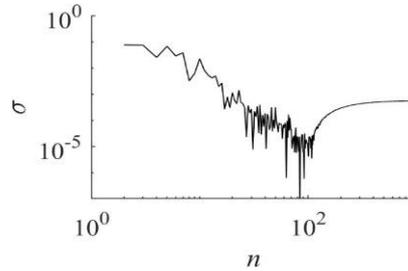


Рисунок 5 – График зависимости среднеквадратичного отклонения σ между анализируемым $S(\lambda)$ и рассчитанным $S'(\lambda)$ спектрами излучения от количества n дискретных отсчетов для спектра излучения RGB- светодиода

Из рисунка 5 следует, что сначала происходит уменьшение σ с ростом числа отсчетов, затем увеличение, что, возможно, вызвано наложением распределений спектрального пропускания. Предложенную методику возможно применять не только для видимой части спектра, но и для ультрафиолетовой и инфракрасной областей.

Литература

1. Никифоров, С. «S-класс» полупроводниковой светотехники / С. Никифоров // Компоненты и технологии. – 2009. – № 6. – С. 88–91.
2. Михайлова, Д. С. / Разработка метода, позволяющего улучшить разрешающую способность дифракционного спектрофотометра / Д. С. Михайлова // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 850–854.

УДК 004.056:061.68

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ УСТРОЙСТВ ОБРАБОТКИ ДВОИЧНЫХ СИГНАЛОВ С МЕЖСИМВОЛЬНОЙ ППРЧ

Бокуть Л. В.¹, Деев Н. А.²

¹Белорусский национальный технический университет

²Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе рассмотрены структурные схемы формирования и обработки двоичных сигналов с межсимвольной ППРЧ, которые позволяют обеспечить снижение энергетических потерь в системе передачи информации.

Ключевые слова: помехоустойчивость, периодическая двоичная псевдослучайная последовательность, устройства обработки двоичных сигналов.

RESEARCH OF NOISE STABILITY OF PROCESSING DEVICES BINARY SIGNALS FROM INTERSYMBOLICAL PPRCH

Bokut L.¹, Deev N.²

¹Belarusian National Technical University

²The United Institute of Informatics Problems of the NAS of Belarus
Minsk, Republic of Belarus

Summary. In the work block diagrams of formation and processing of binary signals from intersymbolical PPRCh which allow to provide decrease in power losses in the system of information transfer are considered.

Keywords: noise stability, periodic binary pseudorandom sequence, processing devices of binary signals.

Адрес для переписки: Бокуть Л. В., ул. Я. Коласа, 22, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: lvbokut@bntu.by

Исследуется помехоустойчивость устройств обработки двоичных сигналов с межсимвольной псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) при действии шумовых помех.

В современных системах радиосвязи широкое применение нашел режим передачи с ППРЧ, который обеспечивает повышение помехоустойчивости передачи цифровой информации. Шумовые помехи обычно создаются путем шумовой модуляции колебаний генератора помех, причем может применяться как амплитудная, так и частотная модуляция, или оба вида модуляции одновременно. Такие помехи имеют энергетический спектр, состоящий из несущего колебания и интенсивных шумовых боковых полос. Необходимо отметить, что из всех видов непрерывных активных помех шумовые помехи наиболее эффективны, поэтому такой вид помех имеет наибольшее распространение.

Рассмотрим систему передачи двоичных сигналов с межсимвольной ППРЧ. Структурная схема формирователя сигнала для случая двоичной фазовой манипуляции (ФМ_Н) и M переключаемых частот приведена на рисунке 1.

Схема включает синтезатор колебаний с частотами f_1 – f_M , фазовые модуляторы ФМ_{НМ}, обеспечивающие манипуляцию колебаний двоичными информационными символами, поступающими от источника информации (ИИ), коммутатор, управляемый генератором псевдослучайной последовательности (ПСП).

Каждое число определяет подключение колебания соответствующей частоты f_i из M возможных. При таком формировании, в каждом из

частотных каналов образуется ФМ колебание, амплитуда которого равна нулю, либо отлична от нуля в зависимости от значения элементов ПСП. При совпадении числа ПСП с номером i -ого канала, сигнал передается в течение интервала T_{Π} , равного длительности элемента ПСП, при отсутствии совпадения образуется пауза. Таким образом, при периоде ПСП равном NT_{Π} максимальная пауза сигнала соответствует этому периоду. В течение активного интервала T_{Π} передается $k = T_{\Pi}/T$ бит информации, где T – длительность информационного символа.

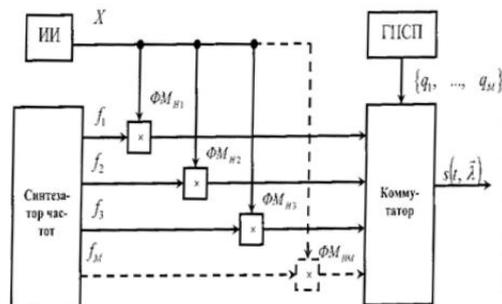


Рисунок 1 – Структурная схема формирователя сигнала

Обобщенная структурная схема устройства обработки двоичных ФМ сигналов приведена на рисунке 2, где в каждом канале выделены два подканала, обеспечивающие выделение элемента ПСП q_i , $i = \overline{1, M}$, и символов X информации. Схема синхронизации по задержке (ССЗ) управляет генератором ПСП, который обеспечивает коммутацию информационных выходов каналов

и объединение информационного потока X . Решение X^* получается в решающем устройстве (РУ).

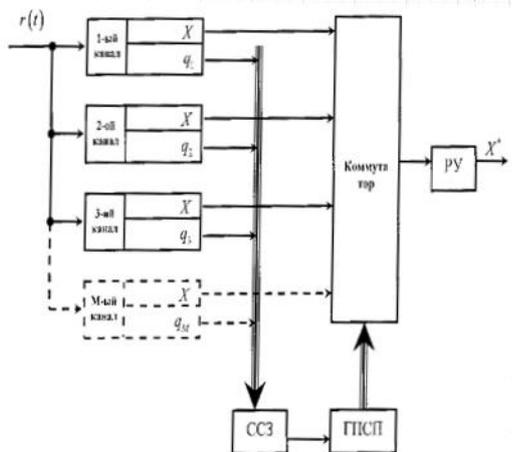


Рисунок 2 – Структурная схема устройства обработки двоичных ФМ сигналов

Помехоустойчивость квазикогерентного устройства обработки двоичных ФМ сигналов с межсимвольной ППРЧ определяется вероятностью ошибки на бит с учетом действия помехи в ССЗ:

$$P_e = 1 - \Phi((q_{01}k)^{1/2}), \quad (1)$$

где P_e – вероятность ошибки на бит информации, q_{01} – отношение сигнал/помеха в канале, k – коэффициент, учитывающий потери за счёт ошибок системы синхронизации ПСП, а также помехи на выходе ТЦФ в каналах формирователя квадратурных составляющих, $k < 1$.

В случае, если $T_{\text{ТФ}} \geq 3T$, то $k > 3/4$, т. е. энергетические потери менее 25 %.

Выражение (1) определяет предельно достижимую помехоустойчивость при действии шумовых помех, достигаемую за счёт применения оптимальной математической зависимости обработки и синхронизированной коммутации каналов на входе решающего устройства.

Структурная схема устройства обработки двоичных ФМ сигналов, представленная на рисунке 2, отличается от известных тем, что свёртка спектра принимаемого сигнала с ППРЧ осуществляется на входе устройства обработки, при этом уровень мощности шумов в M раз больше, чем в отдельном канале. При этом синхронизация опорного генератора ПСП сопровождается ошибками,

которых намного больше, чем в предлагаемой структурной схеме формирователя сигнала, изображенной на рисунке 1.

Действительно, за счёт фильтрации элементов ПСП $q_1 = \gamma = 1$, M в каналах, представленных в схеме устройства обработки двоичных ФМ сигналов на рисунке 2, уровень помех на выходе дискриминатора ССЗ снижается в M раз по сравнению с известными схемами слежения за задержкой.

Рассмотренные структурные схемы формирования и обработки сигналов с межсимвольной ППРЧ обеспечивают различение сигналов с фазовой информационной манипуляцией, что позволяет снизить вероятность ошибки на бит по сравнению с частотной манипуляцией, и обеспечить снижение энергетических потерь в системе передачи информации на 3 дБ.

Литература

1. Бокуть, Л. В. Исследование компенсационного метода подавления помех в радиоканалах охранно-пожарных систем сигнализации / Л. В. Бокуть, Н. А. Деев // Материалы 13 Международной научно-технической конференции «Приборостроение–2020», Минск, БНТУ, 18–20 ноября 2020. – С. 240–242.
2. Бокуть, Л. В. Исследование алгоритмов канального кодирования в системах передачи дискретно-непрерывных сообщений / Л. В. Бокуть, Н. А. Деев // Материалы 15 Международной научно-технической конференции «Приборостроение–2022», Минск, БНТУ, 16–18 ноября 2022. – С. 223–224.
3. Борисов, В. И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В. И. Борисов, В. М. Зинчук; под ред. В. И. Борисова. – 2-е изд., переработанное и дополненное. – М.: РадиоСофт, 2008. – 512 с.
4. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра прямой модуляцией псевдослучайной последовательностью / В. И. Борисов [и др.]. – М.: РадиоСофт, 2011. – 548 с.
5. Чердынцев, В. А. Системы передачи информации с расширением спектра сигналов / В. А. Чердынцев, В. В. Дубровский. – Минск: БГУИР, 2009. – 130 с.
6. Формирование и обработка составных сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты / В. А. Чердынцев [и др.] // Труды XIV Международной НТК «Современные средства связи». – Минск, 2009. – С. 65.
7. Беккиев, А. Ю. Оценка помехозащищенности каналов радиосвязи в условиях действия помех от средств радиоэлектронной борьбы / А. Ю. Беккиев, В. И. Борисов // Радиотехника и электроника. – 2019. – Т. 64, №9. – С. 891–901.

УДК 621.382.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛОТНОСТИ ТОКА В КРЕМНИЕВОЙ ДИОДНОЙ СТРУКТУРЕ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ-РЕКОМБИНАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Борздов А. В.¹, Борздов В. М.¹, Буйновский Д. Н.¹, Петлицкий А. Н.²¹Белорусский государственный университет²ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Многочастичным методом Монте-Карло проведено моделирование флуктуаций плотности тока в кремниевой диодной $n^+ - n - n^+$ -структуре при постоянном напряжении на электродах с учетом процессов генерации-рекомбинации электронов через ловушки. Процессы генерации-рекомбинации включены в процедуру моделирования в качестве дополнительного механизма рассеяния. Времена генерации и рекомбинации электронов рассмотрены в качестве параметров. Рассчитана зависимость времени корреляции токовых флуктуаций от времени генерации при температуре кристаллической решетки 300 К.

Ключевые слова: генерация-рекомбинация, кремниевая диодная структура, метод Монте-Карло, шумовые характеристики.

SIMULATION OF CURRENT DENSITY FLUCTUATIONS IN SILICON DIODE STRUCTURE WITH ACCOUNT OF ELECTRON GENERATION-RECOMBINATION PROCESSES

Borzdov A. V., Borzdov V. M., Buinovskiy D. N., Petlitskiy A. N.

¹Belarusian State University Organization²JSC “Integral” – Holding Management Company

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Ensemble Monte Carlo simulation of current density fluctuations in silicon $n^+ - n - n^+$ -diode structure has been performed for constant applied voltage with account of electron generation-recombination processes via traps. Generation-recombination processes have been included in the simulation procedure as an additional scattering mechanism assuming electron generation and recombination times as parameters. The dependence of current fluctuations correlation time versus the generation time has been calculated for the lattice temperature of 300 K.

Key words: generation-recombination, silicon diode structure, Monte Carlo method, noise characteristics.

Адрес для переписки: Борздов А. В., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: BorzdovAV@bsu.by

Разработка и проектирование субмикронных интегральных приборных структур требует предварительного численного моделирования их электрических характеристик. Многочастичный метод Монте-Карло, как имитационный метод моделирования процессов переноса носителей заряда в полупроводниках и полупроводниковых приборных структурах, является одним из наиболее эффективных методов приборного моделирования в микро- и наноэлектронике [1]. Одним из преимуществ метода Монте-Карло является возможность включения в процедуру моделирования важных физических процессов и явлений, таких, как различные процессы рассеяния носителей заряда, процессы их генерации и рекомбинации, эффекты размерного квантования и др., которые определяют электрофизические свойства, а также электрические и шумовые характеристики полупроводниковых приборов и приборных структур. В данной работе проведено моделирование флуктуаций плотности тока в субмикронной кремниевой диодной $n^+ - n - n^+$ -структуре. Подобного рода полупроводниковые диодные структуры часто рассматриваются в качестве тестовых при моделировании шумовых характеристик, поскольку являются прототипами каналов кремниевых интегральных МОП-транзисторов [2, 3], а также

активно исследуются ввиду возможности их использования в качестве генераторов колебаний СВЧ и терагерцового диапазонов [4, 5].

Сечение моделируемой диодной структуры схематически представлено на рисунке 1. Рассматривается симметричная диодная структура с контактными n^+ -областями длиной $L_1 = L_3 = 100$ нм и уровнем легирования донорной примесью 10^{24} м⁻³, а n -область, называемая каналом диода, имеет длину $L_2 = 100$ нм и уровень легирования 10^{22} м⁻³. Моделирование проводится для температуры кристаллической решетки кремния $T = 300$ К. Легирующая примесь при данной температуре полагается полностью ионизированной.

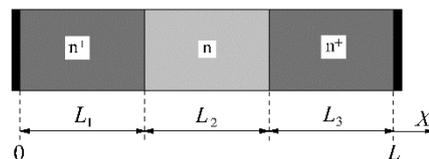


Рисунок 1 – Моделируемая диодная структура

Контакты металл-полупроводник рассматриваются как идеальные омические. Поскольку все области диодной структуры являются кремнием n -типа, то зарядом дырок при моделировании можно пренебречь за исключением заряда, кото-

рый генерируется в процессе ударной ионизации. Для электронов учитываются такие основные механизмы рассеяния, как рассеяние на фонах, ионизированной примеси и плазмонах, а также процесс ударной ионизации. Для дырок процедура моделирования включает рассеяние на фонах и ионизированной примеси.

Моделирование проводится на основе самосогласованного подхода с решением одномерного уравнения Пуассона. Количество моделируемых частиц в ансамбле составляет порядка 25000. Время коррекции электрического поля для самосогласованной процедуры составляет $5 \cdot 10^{-15}$ с.

Процессы генерации-рекомбинации электронов через ловушки включены в качестве дополнительного механизма рассеяния в процедуру моделирования методом Монте-Карло с помощью таких величин, как среднее время рекомбинации носителей заряда τ_r и среднее время их генерации с ловушки τ_g [6]. В этом случае величина $1/\tau_r$ есть интенсивность рассеяния электрона с захватом на ловушку. В случае захвата электрона на ловушку разыгрывается время его нахождения на уровне ловушки t_l в соответствии с формулой $t_l = -\tau_g \ln r$, где r – случайное число, равномерно распределенное на интервале (0, 1). При этом полагается, что пока электрон находится на уровне ловушки, его скорость равна нулю, а его пространственные координаты не изменяются. При генерации электрона с уровня ловушки в зону проводимости его состояние разыгрывается исходя из равновесного максвелловского распределения по импульсам.

Для расчета шумовых характеристик диодной структуры время моделирования флуктуаций плотности тока составляет 1 нс. Времена генерации и рекомбинации полагаются постоянными во всех областях структуры. Время генерации τ_g (среднее время нахождения электрона на ловушке) полагается меньшим времени рекомбинации τ_r .

На рисунке 2 представлена зависимость времени корреляции токовых флуктуаций в структуре t_{cor} от времени генерации электронов τ_g для напряжения между электродами, равного 1 В и времени рекомбинации $\tau_r = 10^{-10}$ с. Время корреляции определяется как

$$t_{cor} = R^{-1}(0) \int_0^{\infty} R(t) dt,$$

где $R(t)$ – автокорреляционная функция токовых флуктуаций [7].

Результаты моделирования флуктуаций плотности тока в диодной n^+-n-n^+ -структуре при постоянном смещении на электродах с учетом процессов генерации-рекомбинации электронов

через ловушки, включенных в процедуру моделирования процессов переноса многочастичным методом Монте-Карло в качестве дополнительного механизма рассеяния, показали, в частности, что при увеличении времени генерации электронов с ловушек τ_g происходит увеличение времени корреляции токовых флуктуаций. Таким образом, включение процессов генерации-рекомбинации в качестве дополнительного механизма рассеяния носителей заряда в процедуру многочастичного метода Монте-Карло является важным при моделировании шумовых характеристик субмикронных полупроводниковых приборных структур.

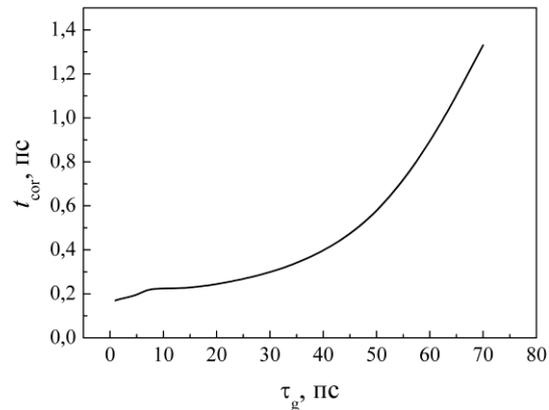


Рисунок 2 – Зависимость времени корреляции токовых флуктуаций t_{cor} от времени генерации τ_g

Литература

1. Борздов, В. М. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники / В. М. Борздов [и др.]. – Мн.: БГУ, 2007. – 175 с.
2. Hydrodynamic and Monte Carlo simulation of steady-state transport and noise in n^+-n-n^+ submicrometer silicon structures / E. Starikov [et al.] // *Semicond. Sci. Technol.* – 1996. – № 11. – P. 865–872.
3. Muscato, O. Electro-thermal behaviour of a sub-micron silicon diode / O. Muscato, V. Di Stefano // *Semicond. Sci. Technol.* – 2013. – № 28. – P. 1–10.
4. Numerical modeling of TeraHertz electronic devices / L. Varani [et al.] // *J. Comput. Electron.* – 2006. – № 5. – P. 71–77.
5. Persano Adorno, D. Monte Carlo simulation of harmonic generation in GaAs structures operating under large-signal conditions / D. Persano Adorno, M. C. Capizzo, M. Zarcone // *J. Comput. Electron.* – 2007. – № 6. – P. 27–30.
6. Microscopic analysis of generation-recombination noise in semiconductors under dc and time-varying electric fields / S. Perez [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2000. – V. 88, № 2. – P. 800–807.
7. Reklaitis, A. Monte Carlo investigation of current voltage and avalanche noise in GaN double-drift impact diodes / A. Reklaitis, L. Reggiani // *J. Appl. Phys.* – 2005. – V. 97. – P. 043709-1–043709-8.

УДК 666.638

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ОБЖИГЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО МАНГАНИТА ЛАНТАНА

Бука А. В.¹, Попов Р. Ю.¹, Колонтаева Т. В.², Шевченко А. А.³

¹Белорусский государственный технологический университет

²Белорусский национальный технический университет

³Белорусский государственный аграрный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе проведен анализ процессов, происходящих при нагревании исходной смеси оксидов и введенных соединений ионов-модификаторов. Установлено влияние минерализатора на процессы, протекающие при обжиге керамической композиции.

Ключевые слова: манганиты, ДСК, влияние, модификаторы.

STUDY OF THE PROCESSES OCCURRING DURING THE FIRING OF CERAMIC MATERIALS BASED ON MODIFIED LANTHANUM MANGANITE

Buka A.¹, Popov R.¹, Kolontaeva T.², Shevchenok A.³

¹Belarusian state technological university

²Belarusian national technical university

³Belarusian state agrarian technical university

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The work analyzes the processes occurring during heating of the initial mixture of oxides and embedded compounds of modifier ions. The effect of the mineralizer on the processes during the firing of a ceramic composition has been established.

Key words: manganites, DSC, influence, modifiers.

Адрес для переписки: Бука А. В., ул. Свердлова 13а, г. Минск 220006, Республика Беларусь

e-mail: lesha_buka@hotmail.com

Целью данной работы является оценка влияния ионов-модификаторов на процессы, происходящих при нагревании керамических масс на основе модифицированного манганита лантана. Определение концентрационного минимума для стабилизации процессов, происходящих при обжиге. Для изучения механизма фазообразования применялся метод *дифференциальной сканирующей калориметрии* (ДСК) – метод, используемый для количественного определения величины теплового потока, испускаемого или получаемого образцом, который подвергается температурному воздействию в контролируемой атмосфере.

Зависимость мощности теплового потока от температуры, записанная датчиками калориметра, после обработки выводится на экран компьютера и представляет собой термоаналитическую кривую (кривую ДСК). Измерения проводилось с помощью прибора Netzsch DSC 404 F3 Regasus (Германия). Данный прибор позволяет выполнить исследование в широком интервале температур, а именно от 20 до 1300 °С в защитной атмосфере аргона, а также с предварительным вакуумированием. В результате химических или физических преобразований, происходящих в тигле с исследуемым веществом при нагревании, тепловой поток изменяется. Это отражается в появлении пиков на термоаналитической кривой, которые обусловлены протеканием в образце процессов, связанных с выделением или поглощением теплоты, или с резким изменением теплоемкости образца, что

создает возможности для более детального исследования преобразований, происходящих в керамических массах.

Широкий интерес к замещенным манганитам редкоземельных элементов (РЗМ) связан с эффектом колоссального магнетосопротивления, способностью перехода в различные магнитные состояния (металл-изолятор, антиферромагнитный металл-антиферромагнитный диэлектрик и др.) при различном виде и содержании модифицирующего иона [1]. Модифицированными манганитами РЗМ являются соединения с общей формулой $A_{1-x}D_xMnO_3$ (где А – катион металла подгруппы лантаноидов, D – катион элемента-модификатора). Существуют манганиты смешенного замещения, соответствующие формуле $AMn_{1-x}B_xO_3$ (где А – катион РЗМ, В – ион переходного элемента) или $A_{1-x}D_xMn_{1-y}B_yO_3$. Данные материалы находят широкое применение в области электронной промышленности. Манганиты являются перспективными соединениями для производства электродов в высокотемпературных твердоотопливных элементах, магниторезистивных датчиков, сенсоров, материалов для создания головок магнитной записи, катализаторов доокисления и др.

Спектр керамических материалов многообразен, но особое внимание уделяется функциональной керамике, так как данный тип материалов предназначен для выполнения определенных видов нагрузок. Такая возможность материала обу-

словлена сочетанием электрических и магнитных свойств. С целью расширения сферы применения, а также стабилизации свойств при получении керамики применяют модификацию структуры [2].

Для настоящего исследования выбирались ионы-модификаторы из лантаноидной подгруппы, поскольку они обладают значительным сродством с лантаном, и, вероятнее всего, они могут беспрепятственно встраиваться в его кристаллическую решетку, оказывая влияние на комплекс физико-химических и электрофизических свойств. Поскольку у данных элементов высокое сродство к лантану не только по происхождению, но и по ионному радиусу, то, согласно правилу Гольдшмита, они смогут полностью встраиваться в его кристаллическую решетку. В качестве таких добавок выбирались оксиды церия и эрбия, вводимые в состав композиции в малых количествах. Исходная смесь представляла собой оксиды лантана и марганца (III). Модифицированные смеси состояли из исходных компонентов, включающих оксиды церия и эрбия в количестве 2 мол.%. Предварительно смеси претерпевали пробоподготовку, а именно – навески порошков исходных компонентов гомогенизировали и тонко измельчали.

На рисунке 1 изображены кривые дифференциально-сканирующей калориметрии исходной смеси, а также включающей ионы-модификаторы.

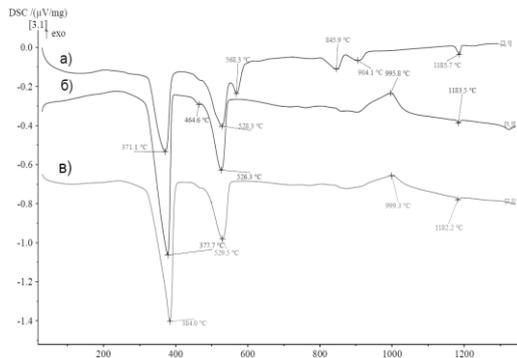


Рисунок 1 – кривые дифференциально-сканирующей калориметрии смеси компонентов: *a* – исходная смесь; *б* – с добавкой оксида церия; *в* – оксидом эрбия

Исследование ДСК проводилось до температуры 1300 °С.

Из кривой ДСК базового состава видны 6 ярко выраженных эндотермических эффектов, которые связаны с возможной дегидратацией и ступенчатым разложением гидроксида и карбоната лантана в области температур от 371,1 до 845,9 °С. Выше данных температур разложение примесных

соединений оксида лантана прекращается. При температурах 904,1 °С и 1185,7 °С наблюдаются эндотермические максимумы, связанные с переходом оксида марганца (III) в смешанный оксид марганца (Mn_3O_4).

Из кривых ДСК модифицированного манганита лантана (ионы-модификаторы Ce^{3+} , Er^{3+}) видно, что эффект при температуре 568,3 °С (рисунок 1 (а)) исчезает. Вероятно, это обусловлено тем, что ионы-модификаторы оказывают стабилизирующее влияние на исходные компоненты системы, что видно по интенсивности основных максимумов, связанных с процессами, происходящими при нагревании оксида лантана и оксида марганца (III). Эндотермический эффект при температуре ~ 1183,5 °С значительно ослабевает, что может быть вызвано с влиянием соединений ионов-модификаторов на процессы фазообразования. На кривых ДСК возникает экзотермический эффект при температуре в области температур 979,9 – 999,3 °С, этот эффект перекрывает два эндотермических эффекта исходной смеси в данном температурном интервале, что можно объяснить образованием при данной температуре новых кристаллических структур с большей свободной энергией, которые способны нивелировать энергию, затрачиваемую на полиморфные превращения, происходящие в материале.

Таким образом, можно сделать выводы о том, что введение в исходную композицию ионов, которые имеют одинаковую химическую природу и высокую степень сродства, существенным образом влияют на теплофизические характеристики, за счет вероятного образования новых соединений или непрерывного ряда твердых растворов различной стехиометрии, обладающих различной температурой кристаллизации, а также кристаллической решеткой. Такие выводы можно сделать по результатам, зафиксированным при использовании дифференциальной сканирующей калориметрии, свидетельствующей о выделении энергии в процессе термообработки образцов экспериментальных масс.

Литература

1. Шарипов, К. Р. Исследование магнитных свойств ферромагнитных кластеров в легированных манганитах лантана : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.11 / К.Р. Шарипов. – Казань, 2014. – 131 л.
2. Плетнев, П. М. Достижения и прогрессивные методы совершенствования функциональных керамических материалов / П. М. Плетнев, И. И. Рогов // Вестник СГУПСа. – 2007. – Вып. 17. – С. 232–244.

УДК 620.179.14

ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ВОЛНОВОДА НА МАГНИТНУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИИ

Бурак В. А.^{1,2}, Осипов А. А.²

¹Институт прикладной физики НАН Беларуси

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследованы зависимости величин магнитных проницаемостей, взятых по петле магнитного гистерезиса при импульсном намагничивании и перемагничивании от геометрических размеров гибких волноводов. Дана оценка возможности осуществления неразрушающего импульсного магнитного контроля размеров и структурного состояния волноводов по рассмотренным магнитным информационным параметрам.

Ключевые слова: гибкие волноводы, импульсный магнитный контроль, магнитная проницаемость, намагничивание.

WAVEGUIDE CROSS-SECTION DIAMETER EFFECT ON MAGNETIC PERMEABILITY DURING PULSE REMAGNETIZATION

Burak V.^{1,2}, Osipov A.²

¹Institute of Applied Physics of NAS of Belarus

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The dependences of magnetic permeability values taken from the magnetic hysteresis loop during pulse magnetization on the geometric dimensions of flexible waveguides are investigated. An assessment of the possibility of implementing non-destructive pulse magnetic control of the dimensions and structural state of waveguides using the magnetic information parameters is considered.

Keywords: flexible waveguides, pulse magnetic testing, magnetic permeability, magnetization.

Адрес для переписки: Бурак В. А., Академическая 16, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: veronika.burak@gmail.com

Гибкие волноводы предназначены для решения ряда актуальных задач в области медицины, техники и технологии. Основное назначение волноводов-концентраторов – разрушение путем измельчения нежелательных образований разной природы под действием акустических волн и эффектов, которые ультразвуковые колебания вызывают в среде, где происходит медицинское или технологическое вмешательство. Одним из популярных материалов для изготовления гибких металлических волноводов является хромисто-никелевая сталь, которая является ферромагнитным материалом и поэтому импульсный магнитный метод представляет особый интерес для решения проблемы оценки и контроля свойств и параметров этих изделий медицинского назначения.

Импульсный магнитный метод неразрушающего контроля хорошо зарекомендовал себя для контроля структурного состояния и физико-механических свойств ферромагнитных материалов и изделий из них. Однако при намагничивании, которое неизбежно при применении импульсного магнитного метода, стоит особое внимание уделять размагничивающему фактору, зависящему от геометрических параметров намагничиваемого тела [1]. В представляемом исследовании была предпринята попытка решить обратную задачу – изучить возможность оценивать геометрические параметры ферромагнитных изделий по

изменению намагниченности при импульсном намагничивании и перемагничивании. Для этого фрагменты гибкого металлического волновода с разным диаметром сечения были подвергнуты намагничиванию и перемагничиванию в проходном датчике измерителя магнитной индукции импульсного ИМИ-И [2]. В результате были получены петли магнитного гистерезиса, проанализированы информативные параметры, взятые по полученным петлям. Магнитная индукция при намагничивании и перемагничивании измерялась посередине намагничиваемого образца. Импульсы первичного магнитного поля были симметричны и противоположны по знаку, имели затянутый задний фронт. Их длительность составляла 400 мс, а амплитуда каждого из двух намагничивающих импульсов была 20 кА/м.

Такой выбор системы намагничивания и системы измерения вторичного магнитного поля был вызван тем фактом, исследуемые фрагменты гибких волноводов имеют большое отношение длины к диаметру поперечного сечения и малый диаметр. Для повышения надежности и точности данных, получаемых прибором ИМИ-И, фрагменты волноводов намагничивались дважды. Это также позволило оценить и сходимости величин анализируемых магнитных информативных параметров.

Исследуемые фрагменты волноводов имели цилиндрическую форму. Были исследованы вы-

резанные из одного металлического гибкого волновода фрагменты трех различных диаметров: 1,95, 1,75 и 1,45 мм. Длины фрагментов были 80, 160 и 140 мм. Для среднего по диаметру фрагмента рассмотрены были две близкие длины – 140 и 160 мм. Так как намагничиванию и перемагничиванию подвергались фрагменты одного волновода, то влияние на вторичное магнитное поле химического состава и фазово-структурного состояния одинаково.

В работе [3] были рассмотрены зависимости величин максимальной индукции и остаточной индукции от диаметров продольного сечения фрагментов волновода, однако на петле магнитного гистерезиса при импульсном намагничивании и перемагничивании можно выделить ряд информативных параметров, пригодных для магнитного неразрушающего контроля. В данной работе будут рассмотрены такие основные безразмерные магнитные параметры как начальная $\mu_{нач}$ и максимальная μ_{max} магнитные проницаемости.

Максимальная магнитная проницаемость μ_{max} с увеличением диаметров образцов уменьшается почти линейно (рисунок 1). Для этого информативного параметра длина исследуемого фрагмента металлического волновода не оказывает особого влияния, это может быть оценено по близости точек, соответствующих величине рассматриваемой магнитной проницаемости при диаметре 1,75 мм, где фрагменты имели разную длину.

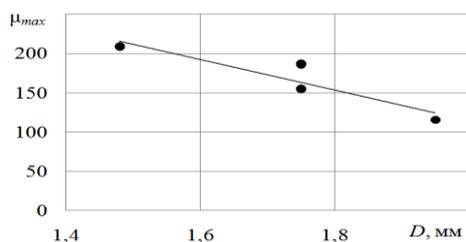


Рисунок 1 – Зависимости максимальной магнитной проницаемости от диаметра поперечного сечения фрагментов гибкого волновода

Величина начальной магнитной проницаемости $\mu_{нач}$ (рисунок 2) также имеет линейную зависимость от изменения диаметра сечения волновода-концентратора и меньше, чем максимальная магнитная проницаемость μ_{max} чувствительна к разнородности образца.

Также для каждого из рассматриваемых параметров, связанных с магнитной проницаемостью, характерна хорошая чувствительность к измене-

нию диаметра, однако начальная магнитная проницаемость $\mu_{нач}$ имеет чувствительность незначительно, но ниже, чем максимальная магнитная проницаемость μ_{max} , соответственно 301 и 313 мм⁻¹.

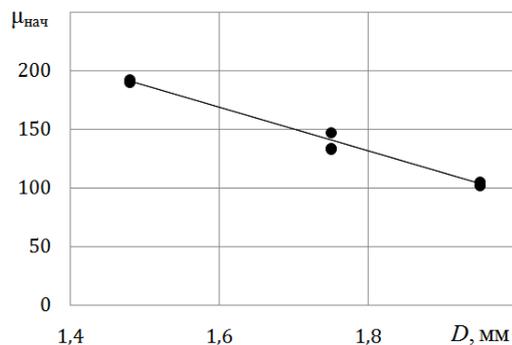


Рисунок 2 – Зависимости начальной магнитной проницаемости от диаметра поперечного сечения фрагментов гибкого волновода

Полученные в работе зависимости и их анализ показывают, что импульсный магнитный метод является перспективным для исследования геометрических параметров, физико-механических свойств и структурного состояния волноводов. Величины начальной и максимальной магнитной проницаемости и максимальная индукция имеют однозначную линейную зависимость с хорошей чувствительностью от изменения диаметра поперечного сечения волновода-концентратора и могут быть взяты в качестве информативных параметров для контроля геометрических параметров металлических волноводов.

Литература

1. Сандомирский, С. Г. Расчет и анализ размагничивающего фактора ферромагнитных тел / С. Г. Сандомирский. – Минск: Беларуская навука, 2015. – 243 с.
2. Короткевич, З. М. Прибор для измерения магнитной индукции ферромагнитных стержней в процессе импульсного намагничивания-перемагничивания / З. М. Короткевич [и др.] // Приборостроение-2013: Материалы 6-й международной научно-технич. конф. Минск, 20–22 ноября 2013 г.; редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2013. – С. 70–72.
3. Бурак, В. А. Влияние размеров волноводов на параметры петли магнитного гистерезиса при импульсном перемагничивании / В. А. Бурак // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: Материалы международной научно-технической конференции, Могилев, 25–26 апреля 2024 г. / Бел. Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2024. – С. 291–292.

УДК 532.135, 537.622, 546.05

ГЕКСАФЕРРИТ БАРИЯ КАК ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ НАПОЛНИТЕЛЬ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Гайдук Ю. С.¹, Коробко Е. В.², Радкевич Л. В.², Котиков Д. А.¹, Усенко А. Е.¹, Паньков В. В.¹

¹Белорусский государственный университет

²Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной Академии Наук Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Целью работы являлось изучение структуры, морфологии, магнитных свойств гексаферрита бария и оценка его эффективности в магнитном поле (по реологическим свойствам магнитоологической жидкости (МРЖ), изготовленной с его использованием). Цитратным золь-гель методом синтезирован феррит бария $BaFe_{12}O_{19}$ гексагональной структуры. С использованием методов рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии, ИК-спектроскопии, исследованы его структурные и микроструктурные особенности. Высокое значение напряжения сдвига суспензии (3,5 кПа) при сравнительно невысокой индукции магнитного поля (625 мТл) позволяют считать полученный материал перспективным для использования в качестве дополнительного функционального наполнителя МРЖ.

Ключевые слова: феррит бария, магнитоологические жидкости, магнитные жидкости.

BARIUM HEXAFERRITE AS A FUNCTIONAL FILLER OF MAGNETORHEOLOGICAL FLUIDS

Haiduk Yu.¹, Korobko E.², Radkievich L.², Kotikov D.¹, Usenka A.¹, Pankov V.¹

¹Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

²Institute of Heat and Mass Transfer named after A. V. Lykov of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The aim of the work was to study the structure, morphology, magnetic properties of barium hexaferrite and to evaluate its efficiency in a magnetic field (by the rheological properties of magnetorheological fluid (MRF) manufactured using it). Barium ferrite $BaFe_{12}O_{19}$ of hexagonal structure was synthesized by the citrate sol-gel method. Its structural and microstructural features were studied using X-ray phase analysis, scanning electron microscopy, and IR spectroscopy. The high value of the suspension shear stress (3500 Pa) at a relatively low magnetic field induction (625 mT) allow us to consider the obtained material promising for use as an additional functional filler for MRF.

Key words: barium ferrite, magnetorheological fluids, magnetic fluids.

Адрес для переписки: Гайдук Ю. С., ул. Ленинградская, 1-416, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: j_haiduk@list.ru

Магнитоологические жидкости (МРЖ) относятся к числу так называемых «интеллектуальных» материалов, реологические и механические свойства (вязкость, напряжение сдвига, предел текучести и т. д.) которых можно контролируемо изменять во внешнем магнитном поле. Известно, что МРЖ могут использоваться в качестве рабочих тел в магнитоуправляемых механических передаточных устройствах, например, в амортизаторах, регулирующих клапанах, различных устройствах виброзащиты и сейсмической защиты, прецизионной полировке, в космической и военной технике, биомеханике и биомедицине и т. д. [1]. В общем случае МРЖ представляют собой суспензии, состоящие из высокодисперсных и ультрадисперсных сильно намагничивающихся частиц, взвешенных в ненамагничивающейся жидкости и стабилизированных поверхностно-активными веществами.

Методика эксперимента. Порошок гексаферрита бария получен методом соосаждения с последующими обработкой в автоклаве и обжигом на воздухе по методике, основанной на литературных источниках [2]. Гидротермальная обработка производилась в автоклаве объемом 500 мл

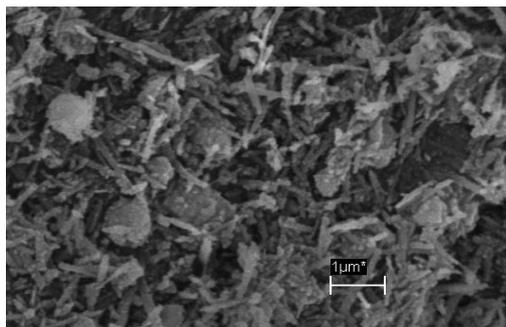
при температуре 220 °С, обжиг при температуре 1020 °С на протяжении 3 ч. На стадии обжига происходил переход в $BaFe_{12}O_{19}$ примесей промежуточных фаз. В качестве исходных реагентов использовали $Ba(NO_3)_2$ («ч»), $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ («ч»), $NaOH$ («чда»). Раствор нитрата железа имел концентрацию 0,384 М, молярные отношения $Ba/Fe=1:8$, $[OH^-]/[NO_3^-]=2$.

Рентгенографические исследования проводили на дифрактометре ДРОН-3 ($CoK\alpha$ -излучение, $\lambda = 0,179026$ нм). ИК-спектр порошка получен на спектрометре AVATAR FTIR-330 (Thermo Nicolet) в области волновых чисел (ν) 400-700 cm^{-1} с разрешением ± 1 cm^{-1} . Микроструктуру образцов изучали при помощи сканирующего электронного микроскопа LEO 1420. Магнитоологическую чувствительность наполнителей определяли на вискозиметре HAAKE RV12, оснащенный индуктором магнитного поля, с измерительной ячейкой типа пластина-пластина. Для приготовления магнитоологической суспензии использовали синтетическое масло Mobil 22 в качестве жидкости-носителя, и моноолеат глицерина в качестве поверхностно-активной добавки.

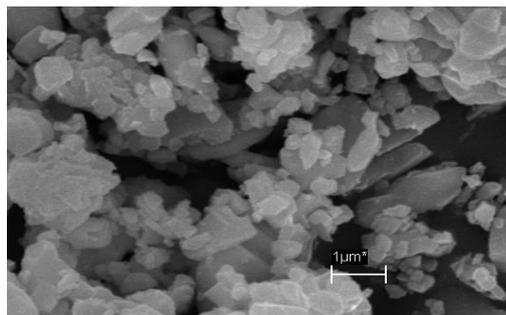
ТГ-ДТА анализ порошка проведен при помощи синхронного термического анализатора Netzsch 400 STA-449с «Jupiter» при скорости нагрева 5°/мин. на воздухе.

Обсуждение результатов. По данным РФА и ИК-спектроскопии конечным продуктом синтеза является порошок с единственной фазой гексаферрита бария, имеющей структуру магнетоплюмбита (карточка PDF-2 [39–1433]).

На рисунке 1 представлены СЭМ-микрофотографии порошка после гидротермальной обработки и после обжига на воздухе. На рисунке 1, а видны в основном пластинчатые частицы, частично агломерированные в округлые структуры диаметром 0,5–1,5 мкм, а также нанопрутки с поперечным диаметром менее 0,1 мкм и длиной 2 мкм и более. Вероятно, эти образования относятся к основной и промежуточной фазе гексаферрита бария. После обжига (рисунок 1, б) видны частицы одного вида, преимущественно пластинчатой формы, диаметр которых составляет 0,2–0,5 мкм. При этом встречаются отдельные агломераты диаметром 1,0–2,0 мкм и более (масштабная шкала 1 мкм).



а



б

а – продукт синтеза в автоклаве; б – порошок после обжига

Рисунок 3 – СЭМ-изображения BaFe₁₂O₁₉

На рисунке 2 представлены зависимости напряжения сдвига МРЖ на основе BaFe₁₂O₁₉ от

скорости сдвига, полученные при различных значениях магнитной индукции.

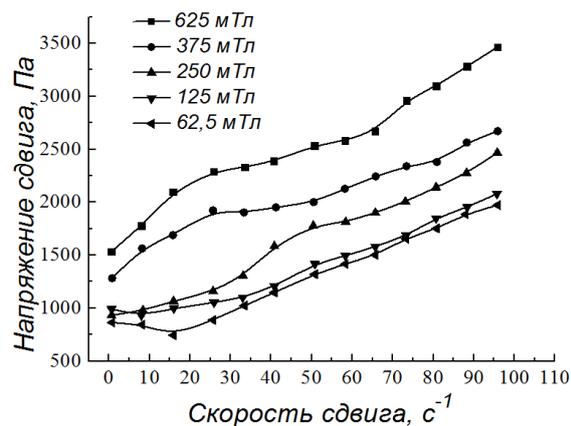


Рисунок 2 – Зависимость напряжения сдвига МРЖ, содержащей 20 мас. % наполнителя на основе BaFe₁₂O₁₉, от индукции магнитного поля

Из рисунка 2 видно, что напряжение сдвига магнитореологической суспензии, изготовленной на основе BaFe₁₂O₁₉ достигает ~ 3500 Па при магнитном поле с индукцией 625 мТл. Пластинчатая форма частиц способствует обеспечению повышенного напряжения сдвига суспензии за счет формирования механически жестко сопряженных структур в магнитном поле.

Из спектров ТГ-ДТА следует, что потеря массы порошка при нагреве в интервале 20–1200 °С составляет не более 1,7 %, при этом порошок не претерпевает ни фазовых переходов, ни других превращений с поглощением или выделением тепла, что призвано обеспечить его стабильную работу при высоких и изменяющихся температурах.

Выводы. Высокое значение напряжения сдвига (~ 3500 Па) при сравнительно невысокой индукции магнитного поля (625 мТл) позволяет считать полученный с применением гидротермального метода гексаферрит бария перспективным материалом для использования в качестве функционального наполнителя МРЖ.

Литература

1. Нанодисперсные наполнители на основе оксида железа для комплексной дисперсной фазы магнитоуправляемых гидравлических жидкостей / Е. В. Коробко [и др.] // Наноструктуры в конденсированных средах: сб. науч. ст. – Минск: Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2018 г. – С. 182–188.

2. Improving the magnetic properties of hydrothermally synthesized barium ferrite / Journal of magnetic properties of hydrothermally synthesized barium ferrite / X. Liu [at al.] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1999. – V. 195, iss. 2. – P. 452–459.

УДК 621.315.592

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ В СТРУКТУРАХ In/CdTe
Гацкевич Е. И.

*Белорусский национальный технический университет
 Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Проведено численное моделирование плавления и отвердевания в гетероструктурах In/CdTe в условиях облучения наносекундными лазерными импульсами. Моделирование проводилось на основе численного решения задачи Стефана с равновесными условиями на границе фазового перехода. Рассмотрены структуры с пленками индия 30, 100 и 400 нм. Проанализированы пиковые температуры поверхности и времена существования расплава в различных режимах облучения.

Ключевые слова: лазерное облучение, задача Стефана, плавление, индий, теллурид кадмия.

SIMULATION OF LASER-INDUCED PROCESSES IN In/CdTe STRUCTURES
Gatskevich E.

*Belarusian National Technical University
 Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Numerical modeling of melting and solidification in In/CdTe heterostructures under irradiation with nanosecond laser pulses has been carried out. The simulation was carried out based on the numerical solution of the Stefan problem with equilibrium conditions at the phase transition boundary. Indium films with thicknesses of 30, 100 and 400 nm were considered. Peak surface temperatures and melting times were analyzed in various irradiation modes.

Key words: laser irradiation, Stefan problem, melting, indium, cadmium telluride.

*Адрес для переписки: Гацкевич Е. И., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
 e-mail: gatskevich_elena@bk.ru*

Теллурид кадмия широко используется для создания детекторов ионизирующего излучения. Перспективность CdTe для изготовления детекторов γ -излучения обусловлена большой шириной запрещенной зоны (1,47 эВ), достаточно высокой подвижностью электронов (1100 см²/(В·с)) и дырок (100 см²/(В·с)) при комнатной температуре, большим атомным номером ($Z_{eff} = 48,52$)

Для формирования *p-n* переходов, которые являются основой полупроводниковых детекторов, применяется метод лазерного легирования. В частности, в работах [1–3] исследованы электрические свойства диодов на основе структур In/CdTe, сформированных методом лазерного легирования.

В настоящей работе проведено численное моделирование лазерно-индуцированных процессов в системе In/CdTe в условиях облучения лазерными импульсами длительностью 20 нс. Толщина пленки варьировалась от 30 до 400 нм. Такие толщины выбраны для моделирования, поскольку именно для этих толщин ранее были получены [1–3] *p-n* переходы методом лазерного легирования.

Моделирование динамики нагрева и плавления структуры In/CdTe проводилось на основе численного решения задачи Стефана. Рассматривалась ситуация равномерного распределения плотности лазерного излучения по облучаемой зоне. Характерная длина диффузии тепла за время импульса τ составляет величину порядка $(\chi\tau)^{1/2}$, где χ – температуропроводность среды. Для обоих компонентов структуры длина тепловой диффузии при длительности лазерного импульса $\sim 10^{-7}$ с

существенно меньше диаметра лазерного пятна. Отсюда следует, что в рассматриваемом случае можно ограничиться одномерным приближением.

В этой постановке задачи нелинейное неоднородное уравнение теплопроводности с условием Стефана на границе фазового перехода имеет вид:

$$\begin{aligned} \rho(x, T) (c(x, T) + L\delta(T - T_m)) \frac{\partial T}{\partial t} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(x, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q(x, t), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0,$$

$$T|_{x=D} = T|_{x=0} = T_0,$$

где T – температура, $T_0 = 300$ К, координата x направлена вглубь образца, ρ – плотность, c – удельная теплоемкость, k – теплопроводность, L – скрытая теплота плавления, T_m – температура плавления, $\delta(T)$ – дельта функция Дирака. Функция $Q(x, t)$ описывает выделение тепла при поглощении лазерного излучения:

$$Q(x, t) = \alpha(T)(1 - R)q(t) \exp \left\{ - \int_0^x \alpha(T(x')) dx' \right\}, \quad (2)$$

здесь α – коэффициент поглощения; R – коэффициент отражения; $q(t) = \frac{W}{\tau} \sin^2 \left(\frac{\pi t}{2\tau} \right)$ – форма лазерного импульса; W – плотность энергии лазерного облучения; τ – длительность импульса.

Поскольку коэффициент отражения индия сильно зависит от температуры и эта зависимость в настоящее время не исследована, моделирова-

ние проводилось для поглощенной энергии, т. е. полагалось, что $R = 0$. На границе пленка – подложка предполагалась идеальная адгезия. Программа построена так, что позволяет учесть зависимости теплофизических и оптических параметров от координаты, температуры и фазового состояния.

Индий характеризуется низкой температурой плавления и малой скрытой теплотой плавления по сравнению с CdTe, но имеет достаточно высокую температуру кипения (2353 К) и большую скрытую теплоту испарения (почти на 2 порядка большую теплоты плавления). CdTe характеризуется низкой теплопроводностью. Это приводит к тому, что пленка практически мгновенно плавится, а потом долго находится в расплавленном состоянии. До температур кипения, по-видимому, испарением в пленке можно пренебречь, поскольку давление насыщенных паров In мало.

Согласно расчетным данным (рисунок 1) для толщин пленок 30 и 100 и даже 400 нм данные по длительности нахождения пленки в жидком состоянии почти совпадают при $W < 100$ мДж/см². При больших плотностях энергий различие возрастает, что особенно видно для пленки толщиной 400 нм. Наибольшая максимальная температура достигается при одних и тех же энергиях в пленке толщиной 30 нм (рисунок 1), причем с ростом плотности энергии до приблизительно 50 мДж/см² различие в температурах для пленок с толщинами 30 и 100 нм увеличивается, с дальнейшим ростом W различие в пиковых температурах уменьшается. Для пленки толщиной 400 нм максимальная поверхностная температура ниже почти на 700–800 К, причем начиная с плотности энергии 50 мДж/см² это различие не изменяется.

Проанализированы зависимости пиковой температуры поверхности и времени существования расплава при облучении с плотностями поглощенной энергии от 10 до 150 Дж/см². Расчетные данные показали, что при облучении системы In/CdTe лазерными импульсами (длительность 20 нс) с плотностями поглощенной энергии менее 100 Дж/см² время существования расплава не зависит от толщины пленки индия. При больших плотностях энергии время существования жидкой фазы увеличивается с толщиной пленки. Пиковые температуры поверхности уменьшаются с увеличением толщины пленки, причем с увеличением толщины пленки различие в пиковых температурах растет. При $W > 50$ мДж/см² различие в пиковых температурах остается постоянным и приблизительно равно 700–800 К.

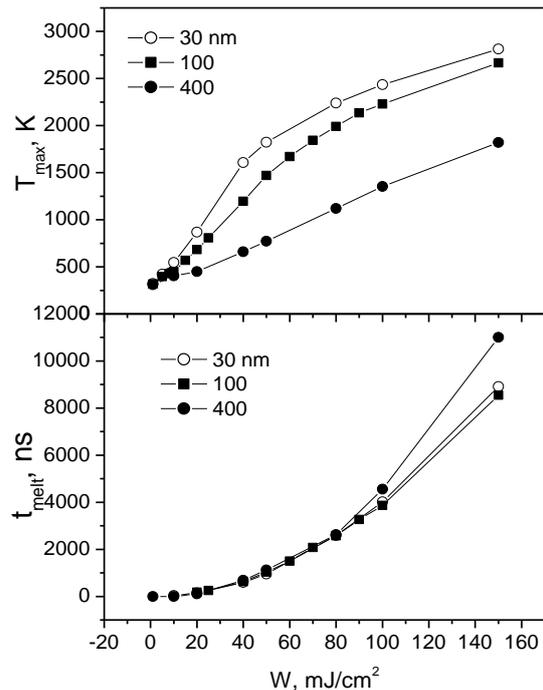


Рисунок 1 – Зависимости пиковой температуры поверхности и времени существования расплава от плотности энергии облучения

Согласно экспериментальным данным [1–3] условия облучения влияют на получение p-n переходов с наилучшими выпрямляющими свойствами. Разработанная модель может быть использована для анализа температурных режимов при формировании диодных структур с использованием метода лазерного легирования.

Литература

1. Gnatyuk, V. A. Mechanisms of laser-induced defect formation and In doping in CdTe crystals / V. A. Gnatyuk, V. A., T. Aoki, Y. Hatanaka // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2004. – V. 51, № 5. – P. 2466–2471.
2. Modification of the surface state and doping of CdTe and CdZnTe crystals by pulsed laser irradiation / V. A. Gnatyuk [et al.] // Applied Surface Science. – 2009. – V. 255, № 24. – P. 9813–9816.
3. Ивлев, Г. Д. Воздействие нанопульсного лазерного излучения на тонкопленочную систему In/CdZnTe / Г. Д. Ивлев, Е. И. Гацкевич, Л. И. Постнова // Сборник статей: 7-й Белорусско-Российский семинар «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе», 1–5 июня 2009 г., Минск. – Минск, 2009. – С. 291–294.

УДК 372+004

МЕТОД АССОЦИАЦИЙ В РАЗДЕЛАХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО И ИНТЕГРАЛЬНОГО ИСЧИСЛЕНИЯ

Гундина М. А., Кондратьева Н. А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассматриваются особенности использования метода ассоциаций при организации лекционных и практических занятий по дисциплине «Математика» в разделах дифференциального и интегрального исчисления.

Ключевые слова: ассоциация, математика, предел, вычисление.

ASSOCIATION METHOD IN MATHEMATICS PRACTICAL LESSONS

Hundzina M., Kondratyeva N.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article examines the features of using the association method in organizing lectures and practical classes in the discipline «Mathematics» in the sections of differential and integral calculus.

Key words: association, math, limit, evaluation.

Адрес для переписки: Гундина М. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: hundzina@bntu.by

Техника ассоциаций позволяет запомнить множество объектов, которые не связаны между собой. С помощью техники ассоциаций устанавливается связь новых знаний, которые учащийся хочет получить, со старыми знаниями, которые он уже имеет.

Сейчас метод, основанный на использовании ассоциаций, используется при изучении различных дисциплин таких, как математика, физика, иностранный язык, биология [1, 2]. Данный метод широко применяется к разным возрастным группам учащихся: от детей дошкольного возраста при изучении иностранных языков до студентов при изучении высшей математики.

Так, например, новые знания из темы «Комплексные числа» можно строить на основе знаний, полученных в школе при изучении темы «Многочлен». Также эта ранее изученная тема позволяет освоить некоторые приемы вычисления пределов. Сложность в усвоении раздела «Предел функции» связана с тем, что студентам сложно запомнить основные определения из раздела «Предел», поскольку зачастую определения формулируются на языке ε - δ . На помощь в этом вопросе приходит метод ассоциаций. Устанавливается связь старой и новой информации.

В психологии под техникой ассоциаций понимают технику, при которой участникам предъявляют целевой стимул и просят ответить первым, что придет им в голову. Этот метод используется для доступа к находящимся в основе подсознательным ассоциациям.

Известно, что ассоциация – это связь, возникающая при определенных условиях между двумя или более психическими образованиями (ощущениями, восприятиями, идеями). Термин был вве-

ден английским философом и педагогом Джоном Локком. Также ассоциации – это нестандартное соединение идей, которые, будучи изначально никак между собой не связаны, в сознании некоторых людей соединяются и начинают работать как единое целое, сопровождая друг друга.

Закрепление ассоциаций обусловлено частотой повторения ассоциаций.

Известно, что под ассоциацией понимают взаимосвязи между отдельными определениями, явлениями, в результате которых упоминание одного понятия вызывает воспоминание о другом, сочетающемся с ним, определением [3].

Существует несколько техник ассоциаций, которые могут быть использованы в учебном процессе высшей школы [4]. Приведем примеры использования этих техник для повышения мотивации обучающихся и увеличения уровня усвоения изученного материала.

Так, например, при введении понятия предел можно рассмотреть ассоциацию с положением падающего мячика (рисунок 1).

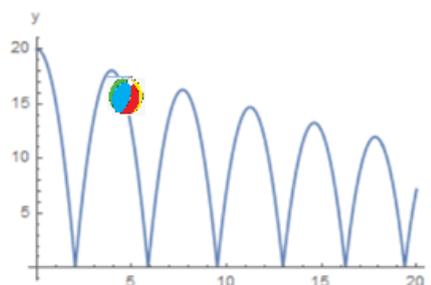


Рисунок 1 – Положение падающего мячика

Команды, реализованные в системе Wolfram Mathematica, выглядят следующим образом:

```

ball=NDSolve[{y''[t]==-9.81,y[0]==20,y'[0]==0,
WhenEvent[y[t]==0,y'[t]->-0.95 y'[t]],y,{t,0,20}];
kin[v_]:=0.5 v^2;
pot[y_]:=9.8 y;
energy[y_,v_]:=kin[v]+pot[y];
GraphicsGrid[{{Plot[y[t]/ball,{t,0,20},AxesLa-
bel->{"t","y"}]}]}.

```

В данном случае в качестве значений последовательности можно определять максимальную высоту, на которую с течением времени поднимается мячик.

При введении в рассмотрение понятия предел функции можно провести ассоциацию с расположением тела человека в азотрубке (рисунок 2).

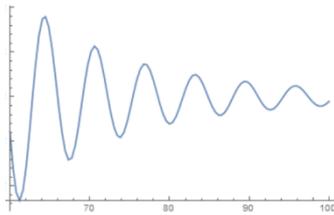


Рисунок 2 – Зависимость положения тела в зависимости от времени

Применение ассоциаций на лекционных и практических занятиях по дисциплине «Математика» способствует развитию творческого мышления учащихся. Метод ассоциаций часто применяется при изучении тех разделов математики, где учащимися допускаются большое количество ошибок, либо, где теоретический материал содержит большое количество абстрактных, сложных для усвоения, определений. Применение метода ассоциаций позволяет продуктивно использовать воображение и элементы игры для усвоения изучаемого материала, что повышает интерес к учебному процессу и делает процесс обучения более увлекательным.

Метод ссылок – один из методов создания ассоциаций между запоминаемым элементом и изображением. Этот метод состоит из трех этапов:

1. Разделение сложной идеи и поиск слова-заменителя для их представления. С помощью метода ссылок происходит поиск четкого изображения, связанного с идеей, которую оно представляет.

2. Создание ярких мысленных образов этих идей, используя воображение. Поскольку для использования метода ссылок нужно установить прочные связи между идеями, потребуются запоминающиеся изображения. Образ может быть преувеличенным или забавным, поскольку его проще будет запомнить.

3. Нахождение ассоциации между этими визуальными образами. Теперь нужно представить, как первое изображение что-то делает со следующим изображением, которое, в свою очередь, что-то делает со следующим, и т. д. и т. д., связывая

идеи вместе. Использование воображения позволяет ясно увидеть цепочку событий, как историю.

Метод истории заключается в создании некоторой истории, чтобы соединить все элементы в списке определений. Здесь под историей понимается набор событий, следующих в хронологическом порядке. Последовательность изложения и сила образов помогут вспомнить исходную информацию.

Так, например, при изучении темы «Вычисление интегралов методом трапеций» можно построить ассоциацию с нахождением площади песчаной криволинейной области, примыкающей к реке (рисунки 3 и 4).



Рисунок 3 – Изображение берега реки

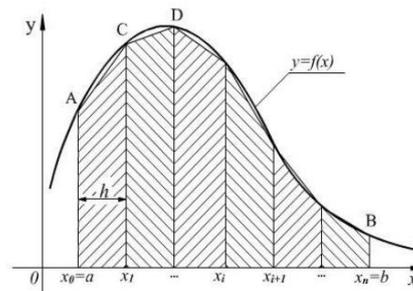


Рисунок 4 – Схема метода изображений

Смешная или странная история легко запоминается. В других случаях, особенно когда изучаются более абстрактные концепции, нужно будет создать собственные «образы подсказки», чтобы активировать воспоминания.

Метод ассоциаций позволяет сделать структурным процесс запоминания. У студентов повышается уровень концентрации и переключаемости внимания.

Литература

1. Dibagi, S. G. Brain storming and association in mathematics education / S. G. Dibagi // Procedia – Social and Behavioral Sciences. – 2012. – V. 31. – P. 774–777.
2. Modeling students' interest in mathematics homework / S. G. Dibagi [et al.] // The Journal of Educational Research. – 109 (2). – P.148–158.
3. Осипов, Ю. С. Большая российская энциклопедия / Ю. С. Осипов. – 2005. – С. 381–382.
4. 5 Memory Association Techniques for students [Electronic resource]. – Mode of access: <https://mafadi.co.za/5-memory-association-techniques-for-students>.

УДК 539.4

НАНОРАЗМЕРНАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖЕК ИЗ МОНОКРИСТАЛЛОВ НРНТ АЛМАЗА ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Гусаков Г. А.¹, Шаронов Г. В.¹, Баран Л. В.²

¹НИИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ

²Белорусский государственный университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследованы технологические процессы прецизионной обработки поверхности подложек из монокристаллов синтетического алмаза оптоэлектронного назначения. Установлено, что примесь никеля оказывает существенное влияние на качество механической шлифовки поверхности алмаза. Показано, что комплексный подход, основанный на отборе кристаллов по содержанию примеси никеля, проведении предварительного вакуумного отжига, механической шлифовки и финишной полировки с использованием в качестве полировальной суспензии смеси субмикронных алмазных порошков и модифицированных наноалмазов детонационного синтеза позволяет получать атомно-гладкие поверхности НРНТ алмазных подложек с шероховатостью $R_a \leq 0,4$ нм.

Ключевые слова: алмазные подложки, примеси, вакуумный отжиг, шлифовка, полировка.

NANOSCALE PROCESSING OF THE HPNT-DIAMOND SUBSTRATES FOR OPTOELECTRONICS DEVICES

Gusakov G.¹, Sharonov G.¹, Baran L.²

¹A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems

²Belarusian State University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The technological processes of precision processing of the substrates surface made from synthetic diamond single-crystals for optoelectronic devices were studied. It was found that the nickel impurity has a significant effect on the quality of mechanical grinding of the diamond surface. It is shown that a comprehensive approach based on the selection of crystals by nickel impurity content, preliminary vacuum annealing, mechanical grinding and final polishing using a mixture of submicron diamond powders and modified detonation synthesis nanodiamonds as a polishing suspension allows obtaining atomically smooth surfaces of HPNT diamond substrates with a roughness $R_a < 0.4$ nm.

Keywords: diamond substrates, impurities, vacuum annealing, grinding, polishing.

Адрес для переписки: Гусаков Г. А., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: gga68@rambler.ru

Введение. Прогресс в области фотоники и твердотельной электроники, в первую очередь, определяется развитием технологии подложек, на основе которых производятся оптоэлектронные приборы и интегральные схемы. В этой связи алмаз уже давно признан исключительным материалом с уникальными механическими, тепловыми и оптическими свойствами. В настоящее время оптоэлектронные приборы с использованием алмазов становятся реальностью, поскольку промышленность освоила выпуск синтетических кристаллов больших размеров [1, 2]. Намечившиеся в последнее время перспективы создания различных устройств силовой электроники и оптоэлектроники на алмазе требуют создания алмазных подложек оптического качества с ненарушенной кристаллической структурой поверхностного слоя [3, 4]. В этой связи значительные усилия направляются на разработку оборудования и технологических процессов полировки алмазных подложек для получения поверхностей высшего класса чистоты [5, 6].

Материалы и методы. В настоящей работе исследовались кристаллы синтетического алмаза,

выращенные методом температурного градиента (НРНТ-метод) в системе Ni-Fe-C. Примесный состав образцов исследовался методом поглощения света в ИК и видимом диапазонах спектра. Для модификации дефектно примесной структуры НРНТ-алмазов использовался вакуумный отжиг ($P = 10^{-2}$ Па, $T = 1500$ °С). Шлифовка базовой плоскости путем последовательной обработки на чугуновых дисках, шаржированных алмазным порошком АСН с зернистостью 20/14, 10/7, 5/3 и 2/1 мкм. Для финишной полировки применялась специально разработанная виброполировальная установка. Полирующей смесью являлись водная эмульсия субмикронного алмазного порошка с зернистостью менее 1 мкм и модифицированных наноалмазов детонационного синтеза (ДНА) в пропорции 50/50. Морфология поверхности образцов после обработки исследовалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Результаты и обсуждение. Основными примесями в исследованных кристаллах НРНТ-алмаза являются азот и никель. Примесь азота содержится преимущественно в форме одиночных ато-

мов в положении замещения (С-дефект). Концентрация этой примеси находится в интервале 100–200 ppm. Примесь никеля содержится как в форме одиночных атомов, так и в форме комплексов, включающих в себя атомы никеля, азота и вакансии. Концентрация никеля в исследованных кристаллах различалась на порядок, и ее значения находились в диапазоне 1–20 ppm.

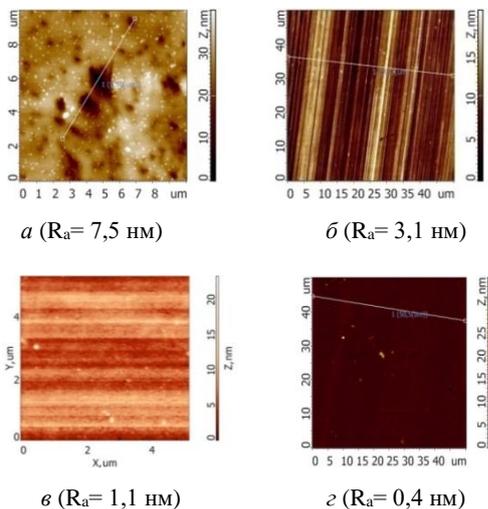


Рисунок 1 – АСМ-изображения и профилограммы поверхности алмазных пластин после различных обработок: а – образец с высоким содержанием примеси никеля после механической шлифовки; б – образец с низким содержанием примеси никеля после механической шлифовки; в – после вакуумного отжига и механической шлифовки; г – после механической шлифовки и виброполировки с использованием модифицированных ДНА

В результате проведенных экспериментов установлено, что примесь азота не оказывает заметного влияния на качество механической шлифовки поверхности подложек их НРНТ-алмазов. Для образцов с высоким содержанием примеси никеля обнаружено образование зоны со значительной неоднородностью рельефа поверхности в центральной области кристалла. В этой области регистрируется наличие большого количества впадин глубиной до 30 нм (рисунок 1, а). В результате среднее значение шероховатости поверхности R_a для этих образцов составляет 6–8 нм, в то время как для образцов с низким содержанием примеси никеля эти значения находятся в интервале 2–3,5 нм (рисунок 1, б). Образование этой зоны может быть связано с изменением механизма износа области кристалла с повышенным содержанием никеля.

Вакуумный отжиг позволяет эффективно воздействовать на дефектно-примесную структуру и физические характеристики НРНТ-алмазов. Для кристаллов с низким содержанием примеси никеля в результате вакуумного отжига при $T = 1500^\circ\text{C}$ наблюдается полное исчезновение поглощения

связанного с одиночными атомами никеля. Как следствие регистрируется увеличение теплопроводности кристаллов на 40–50 % и улучшение обрабатываемости поверхности при механической полировке (рисунок 1, в). Для кристаллов с высоким содержанием примеси никеля в результате вакуумного отжига наблюдается образование дислокаций. Теплопроводность кристаллов снижается на 30–40 %. Кроме того, наблюдается увеличение значений R_a .

Финишная полировка с использованием субмикронных алмазных порошков снижает шероховатость поверхности алмазных пластин по сравнению с механической шлифовкой в 2–3 раза. Значения R_a для готовых подложек находятся в диапазоне от 1,1 до 1,7 нм. Полировка с использованием в качестве полировальной суспензии смеси субмикронных алмазных порошков и модифицированного ДНА показывает наибольшую эффективность. Шероховатость поверхности алмазных пластин снижается до уровня 0,35–0,4 нм (рисунок 1, г). Следует отметить, что полученный уровень шероховатости поверхности подложек близок к значению постоянной решетки алмаза 0,357 нм. Таким образом, можно говорить об атомно-гладкой поверхности изготовленных алмазных подложек.

Заключение. Из приведенных выше экспериментальных результатов следует, что комплексный подход, основанный на отборе кристаллов по содержанию примеси никеля, проведении предварительного вакуумного отжига, механической шлифовки и финишной полировки с использованием в качестве полировальной суспензии субмикронных алмазных порошков и модифицированных наноалмазов детонационного синтеза позволяет получать атомно-гладкие поверхности НРНТ алмазных подложек с шероховатостью $R_a \leq 0,4$ нм.

Литература

1. Large-area high-quality single crystal diamond / M. Schreck [et al.] // MRS Bull. – 2014. – V. 39. – P. 504–510.
2. Crystal growth of diamond / Y.N. Palyanov [et al.] // In: Handbook of crystal growth: bulk crystal growth. – 2nd ed. – New York (NY): Elsevier, 2015/ – P. 671–713.
3. Umezawa, H. Recent advances in diamond power semiconductor devices / H. Umezawa // Materials Science in Semicond. Processing. – 2018. – V. 78. – P. 147–156.
4. Miet, S. Integrated photonic devices in single crystal diamond / S. Miet // J. Phys. Photonics. – 2020. – V. 2. – P. 042001.
5. Polishing and planarization of single crystal diamonds: state-of-the-art and perspectives / H. Luo [et al.] // International Journal of Extreme Manufacturing. – 2021. – V. 3, № 2. – P. 022003.
6. Hicks, M. L. Polishing, preparation and patterning of diamond for device applications / M. L. Hicks, A. C. Pakpour-Tabrizi, R. B. Jackman // Diam. Relat. Mater. – 2019. – V. 97. – P. 107424.

УДК 681.5: 631.34

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В ФИТОТРОНЕ

Гусенников Е. Н., Юран С. И.

Удмуртский государственный аграрный университет
Ижевск, Российская Федерация

Аннотация. В статье приводится расчет тепловых процессов системы автоматического поддержания заданной температуры в камере фитотрона с последующим компьютерным моделированием тепловых процессов в контексте разрабатываемого устройства.

Ключевые слова: фитотрон, нагрев камеры, компьютерное моделирование, автоматизированное поддержание микроклимата.

MODELING THERMAL PROCESSES OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM IN THE PHYTOTRON

Gusennikov E., Yuran S.

Udmurt State Agrarian University
Izhevsk, Russian Federation

Abstract: The article presents the calculation of thermal processes of the system for automatic maintenance of a given temperature in the phytotron chamber, followed by computer modeling of thermal processes in the context of the device being developed.

Key words: phytotron, chamber heating, computer modeling, automated microclimate maintenance.

Адрес для переписки Юран С.И., 426069, Российская Федерация, г. Ижевск, ул. Студенческая, 11
e-mail: yuran-49@yandex.ru

Введение. В настоящее время сельское хозяйство движется в сторону повышения эффективности выращивания растений в искусственных условиях, вследствие чего важным направлением исследований является разработка и улучшение различных методов и устройств создания контролируемых условий микроклимата. Одним из ключевых контролируемых факторов при росте растения является температура окружающего воздуха, так как она влияет на фотосинтез, дыхание, транспирацию, поглощение питательных веществ и деление клеток растения [1]. Вследствие этого важно точно поддерживать данный параметр в устройствах искусственного выращивания растений. При проектировании данных устройств требуется проведение расчета тепловых процессов. Ниже представлен пример расчета изменения температуры воздуха в камере выращивания с течением времени.

Определение температуры воздуха. Температура воздуха в камере определяется по следующей формуле (1)

$$T_{\text{внутр}}(t) = T_{\text{внутр.нач}} + \frac{dT_{\text{внутр}}(t)}{dt}, \quad (1)$$

где $T_{\text{внутр}}(t)$ – температура внутри камеры в конкретный момент времени t , К; $T_{\text{внутр.нач}}$ – температура внутри камеры в начале работы, К; $\frac{dT_{\text{внутр}}(t)}{dt}$ – изменение температуры внутри камеры в течение времени t , К/с.

Изменение температуры внутри камеры определяется по следующей формуле (2)

$$\frac{dT_{\text{внутр}}(t)}{dt} = \frac{1}{m_{\text{в}} \cdot c_{p,\text{в}}} \cdot (Q_{\text{нагрев}}(t) + Q_{\text{Т.обмен}}(t) + Q_{\text{пров}}(t) + Q_{\text{раст}}(t)), \quad (2)$$

где $T(t)$ – температура воздуха в камере в момент времени t , К; $m_{\text{в}}$ – масса воздуха в камере, кг; $c_{p,\text{в}}$ – удельная теплоемкость воздуха, Дж/кг · К; $Q_{\text{нагрев}}(t)$ – количество теплоты от нагрева ТЭНа в момент времени t , Дж; $Q_{\text{Т.обмен}}(t)$ – количество теплоты, теряемой при теплообмене камеры с внешней средой в конкретный момент времени t , Дж; $Q_{\text{пров}}(t)$ – количество теплоты, теряемой при проветривания камеры в конкретный момент времени t , Дж; $Q_{\text{раст}}(t)$ – количество теплоты, излучаемое процессами жизнедеятельности растений в конкретный момент времени t , Дж.

В свою очередь количество теплоты от нагрева ТЭНа определяется по формуле (3)

$$Q_{\text{нагрев}}(t) = P_{\text{ТЭН}}(t) \cdot \eta_{\text{ТЭН}} \cdot k_{\text{т.отд.ТЭН}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{ТЭН}}(t)$ – мощность электронагревателя, изменяемая во времени t , Вт; $\eta_{\text{ТЭН}}$ – КПД электронагревателя; $k_{\text{т.отд.ТЭН}}$ – коэффициент теплоотдачи электронагревателя в воздух.

Количество теплоты, теряемой при теплообмене камеры с внешней средой, определяется по формуле (4)

$$Q_{\text{т.обмен}}(t) = k_{\text{т.отд.корп}} \cdot S_{\text{корп}} \cdot (T_{\text{внеш}} - T_{\text{внутр}}), \quad (4)$$

где $k_{\text{т.отд.корп}}$ – коэффициент теплообмена корпуса камеры с окружающей средой; $S_{\text{корп}}$ – эффективная поверхность теплообмена камеры с воздухом, м²;

$T_{\text{внеш}}$ – температура внешней среды, К;
 $T_{\text{внутр}}$ – температура внутри камеры, К.

Теплообмен камеры за счет проветривания можно найти по формуле (5)

$$Q_{\text{пров}}(t) = v_{\text{пров}}(t) \cdot \rho_{\text{в.внеш}}(T_{\text{внеш}}) \times c_{p,\text{в}} \cdot (T_{\text{внеш}} - T_{\text{внутр}}), \quad (5)$$

где $\rho_{\text{в.внеш}}(T_{\text{внеш}})$ – плотность внешнего (входящего) воздуха, кг/м³; $v_{\text{пров}}(t)$ – объем проходящего воздуха в единицу времени t , м³/с.

Тепловая мощность, излучаемая процессами жизнедеятельности растений $Q_{\text{раст}}(t)$, зависит от таких параметров выращиваемого растения как вид растений, размер, возраст и окружающие условия. Данную информацию следует выбирать по растениеводческим справочникам, разделяя тепловыделение в активной фазе и в фазе сна растения.

Моделирование температуры воздуха в фитотроне. Основываясь на данном алгоритме определения текущей температуры воздуха в камере $T_{\text{внутр}}(t)$, было проведено компьютерное моделирование тепловых процессов.

В качестве объекта моделирования был выбран разрабатываемый прототип бытового фитотрона [2, 3], приблизительный внешний вид которого представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Вид разрабатываемого устройства

Моделируемый фитотрон обладает следующими параметрами: высота, ширина и глубина камеры выращивания $B \times Ш \times Г = 0,3 \times 0,3 \times 0,24$ м (объем камеры $V_{\text{кам}} = 0,0216$ м³, эффективная поверхность теплообмена камеры $S_{\text{корп}} = 0,392$ м²); коэффициент теплообмена корпуса камеры с окружающей средой $k_{\text{т.отд.корп}} = 5,5$ Вт/К · м² (листовая крашенная сталь); мощность электронагревателя $P_{\text{ТЭН}}(t) = 30$ Вт; КПД электронагревателя $\eta_{\text{ТЭН}} = 0,9$ коэффициент теплоотдачи электронагревателя в воздух $k_{\text{т.отд.ТЭН}} = 0,95$.

Заданные условия автоматического управления для выращивания растений: заданная температура внутри камеры $T_{\text{внутр}}(t) = 27$ °С, температура внутри камеры в начале моделирования $T_{\text{внутр.нач}} = 19$ °С, температура внешней среды

$T_{\text{внеш}} = 19$ °С, заданный объем двухамого воздуха в единицу времени вентилятором $v_{\text{пров}}(t) = 1,2 \cdot 10^{-6}$ м³/с.

Результат компьютерного моделирования отражает график зависимости температуры воздуха от времени, представленный на рисунке 2.

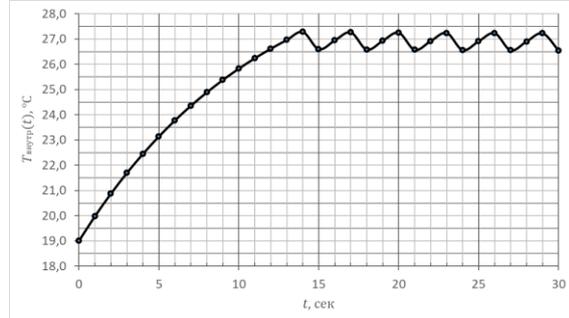


Рисунок 2 – График изменения температуры воздуха в моделируемой камере фитотрона от времени

Проведенное моделирование ограничено периодом времени $t = 30$ с, так как из-за низкой степени колебаний САР график относительно быстро стабилизируется. В результате моделирования установилась температура в камере $T_{\text{уст}} = 26,9$ °С, со временем регулирования $t_{\text{рег}} = 12$ с. Перерегулирование системы автоматики составило $\sigma = 1$ %, с установившейся погрешностью $\epsilon_0 = -0,1$ °С.

Вывод. В ходе моделирования был получен прогноз изменения температуры в камере выращивания. В дальнейших работах планируется провести сравнительный эксперимент компьютерной модели с разработанным прототипом.

Литература

1. Гусенников, Е. Н. Пути создания благоприятных условий для роста рассады в условиях закрытого грунта / Е. Н. Гусенников, С. И. Юран // Наука и молодежь: новые идеи и решения в АПК : Материалы Национальной научно-практической конференции молодых ученых с международным участием, посвященной 80-летию Удмуртского ГАУ, Ижевск, 28 ноября – 01 2023 года. – Ижевск: Удмуртский государственный аграрный университет, 2023. – С. 175–184.
2. Гусенников, Е. Н. Концепт комбинированного устройства контролируемого выращивания растений для бытового применения / Е. Н. Гусенников, С. И. Юран // Современные тенденции технологического развития АПК: материалы Международной научно-практической конференции, Ижевск, УдГАУ, 2024. – С 253–256.
3. Гусенников? Е. Н., Система контролируемого выращивания растений для бытового применения / Е. Н. Гусенников, С. И. // Материалы 17-й Международной НТ конференции молодых ученых и студентов. – Минск: БНТУ, 2024. – С. 73.

УДК 620.178.152.28

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УПРОЧНЕНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ СФЕРИЧЕСКИМ НАКОНЕЧНИКОМ

Доронин К. И.¹, Уманский А. С.¹, Гоголинский К. В.²

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

Санкт-Петербург, Российская Федерация

²НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Гатчина, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассмотрены особенности моделирования процесса индентирования сферическим индентором при различных коэффициентах упрочнения n исследуемого материала. С помощью метода конечных элементов получены диаграммы индентирования материала с заданными свойствами, близкими к стали Ст3. Выявлено изменение расчетных значений твердости и модуля упругости при увеличении значения n . Получены значения n , при которых упругие свойства в виде модуля упругости при индентировании E_{IT} наиболее совпадают с заданным значением в 200 ГПа. Построены профили сечения зоны индентирования для различных n .

Ключевые слова: инструментальное индентирование, компьютерное моделирование, модуль упругости.

INFLUENCE STUDY OF THE HARDENING EXPONENT ON THE RESULTS OF SIMULATED INSTRUMENTED INDENTATION TEST WITH A SPHERICAL TIP

Doronin K.¹, Umanskii A.¹, Gogolinskii K.²

¹Saint Petersburg Mining University

St. Petersburg, Russian Federation

²NRC "Kurchatov Institute" – PINP

Gatchina, Russian Federation

Abstract. The paper examines the features of modeling the process of indentation by a spherical indenter at various strain hardening exponent n of the material under the study. Indentation curves for a material with specified properties close to St3 steel were obtained using the finite element method. Difference in calculated hardness and Young's modulus with increasing n value was revealed. The values of n were identified at which the elastic properties in the form of indentation modulus E_{IT} most closely coincide with the specified value of 200 GPa. The cross-sectional profiles of the indentation zone were built for different n .

Key words: instrumented indentation, computer simulation, Young's modulus.

Адрес для переписки: Доронин К. И., 21-я линия В. О., 2, г. Санкт-Петербург 199106, Российская Федерация, e-mail: doronin.k.i@mail.ru

Введение. При компьютерном моделировании процессов деформации ключевую роль играет описание поведения материала при определенной нагрузке. В случае моделирования процесса индентирования важно учитывать функцию упрочнения материала, так как при индентировании возникают напряжения, превышающие предел текучести материала σ_y . Возможности метода конечных элементов применительно к задачам моделирования процесса контактного взаимодействия позволяют оценить такие явления как навал и прогиб в зоне деформации. В дальнейшем это позволит учесть влияние указанных факторов при разработке методик обработки экспериментальных данных при измерении механических свойств методами инструментального индентирования (ИИ).

Методы. Для решения задачи моделирования контактного взаимодействия при индентировании применяется метод конечных элементов (МКЭ) в среде COMSOL Multiphysics. Решение осуществляется временным решателем для осесимметричной геометрии. Для описания поведе-

ния материала при деформации используется модель степенного закона, также используемая в решениях задач индентирования в работах [1, 2] и представленная в формуле (1). В процессе моделирования сравнивается поведение материала при различных коэффициентах упрочнения $n = [0,0-1,0]$ с шагом 0,1. Для испытуемого материала заданы модуль упругости $E = 200$ ГПа и предел текучести $\sigma_y = 250$ МПа.

$$\sigma = K\varepsilon^n \text{ при } \varepsilon > \varepsilon_y, \quad (1)$$

где K – константа материала; ε_y – деформация при пределе текучести; n – коэффициент упрочнения.

Контактная глубина h_c для расчета твердости H_{IT} и модуля упругости E_{IT} при ИИ вычисляется двумя способами. Первый основывается на расчете глубины при индентировании шаром и описывается формулой (2) [3, 4].

$$h_c = (h_{max} + h_f) / 2, \quad (2)$$

где h_{max} – максимальная глубина внедрения относительно поверхности материала, h_f – остаточная глубина, при которой нагрузка уже отсутствует.

Второй способ основан на построении касательной в области разгрузки (метод Оливера-Фарра) [5]. В таком случае используется формула (3).

$$h_c = h_{max} - \varepsilon (h_{max} - h_r), \quad (3)$$

где h_r – точка пересечения касательной с осью глубины h , ε – коэффициент, учитывающий форму индентора. Для сферического индентора $\varepsilon = 0,75$. Применимость разных способов обоснована в [6].

Результаты. Построенные в процессе моделирования диаграммы индентирования представлены на рисунке 1. Значения по глубине индентирования нормированы относительно h_{max} для визуальной демонстрации изменения угла наклона этапа разгрузки. Действительная глубина же уменьшалась с увеличением n 1057 нм до 586 нм соответственно. Расчет твердости H_{IT} представлены в таблице 1 (справочное значение твердости для аналогичного материала Ст3 – 131 НВ $\approx 1,3$ ГПа).

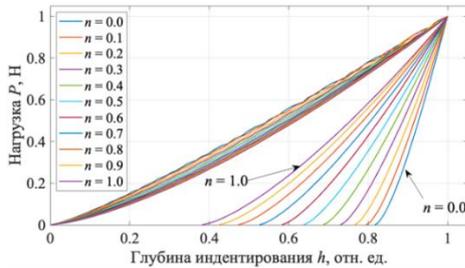


Рисунок 1 – Диаграммы индентирования $P(h)$

Таблица 1 – Твердость H_{IT} , ГПа в зависимости от способа расчета для некоторых n

n	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$h_c (h_i)$	0,83	0,98	1,19	1,45	1,72	1,96
$h_c (h_r)$	0,85	1,01	1,24	1,53	1,84	2,09

Изменение угла наклона этапа разгрузки влияет на вычисление модуля упругости. Результаты его расчета относительно двух способов представлены в таблице 2. Для обоих методов демонстрируется снижение расчетных значений модуля упругости при возрастании n , однако расчет через остаточную глубину h_r фиксирует большую ошибку относительно опорного значения 200 ГПа (максимальное относительно отклонение 23 % против 16 %). При этом ошибка в классическом методе Оливера-Фарра ($h_c(h_r)$) при МКЭ также выявлена в [7], где наблюдается завышение модуля упругости.

Таблица 2 – Модуль упругости E_{IT} , ГПа в зависимости от способа расчета для некоторых n

n	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$h_c (h_i)$	246	235	223	208	196	190
$h_c (h_r)$	202	186	176	169	168	168

При анализе профилей индентирования использовалась геометрия после разгрузки. Профили сечения зоны индентирования для разных n представлены на рисунке 2. Для обеспечения сравнения данные глубины индентирования нормированы в соответствии с [3]: z/h для оси сим-

метрии z и r/a для радиальной координаты r , где a – радиус контакта при индентировании. Такая форма профилей индентирования сходится с [8] и имеет общий вид увеличения навала при уменьшении n . Явление навала четко идентифицируется при $n < 0,3$.

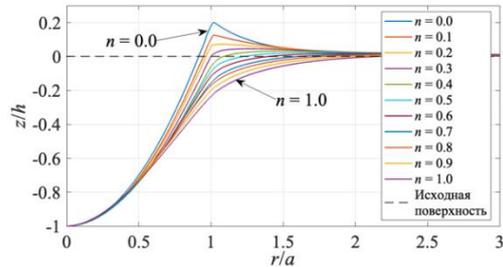


Рисунок 2 – Сечение зоны индентирования

Выводы. Полученные результаты позволяют оценить зависимость расчетных механических свойств по методу ИИ при увеличении коэффициента упрочнения n . Зависимость для твердости имеет монотонно возрастающий характер, для модуля упругости – монотонно убывающий. Построенная модель может быть использована для анализа контактно-ударного взаимодействия. В этом случае потребуются более точная оценка профилей зоны индентирования в момент максимальной нагрузки P_{max} .

Литература

- Long, X. Critical Review of Nanoindentation-Based Numerical Methods for Evaluating Elastoplastic Material Properties / X. Long, R. Su, Y. Dong, C. Chang, // Coatings. – 2023. – V. 13. – P. 1334.
- Destructive Hardness Indentation Measurement of Residual Stress on Large Aerospace Forged Components at the Engineering Site Based on Impact Hardness Tester / J. Niu // Materials. – 2024. – V. 17. – P. 3436.
- Oliver, W. C. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology / W. C. Oliver, G. M. Pharr // J. Mater. Res. – 2004. – V. 19. – P. 3–20.
- Крень, А. П. Определение физико-механических характеристик изотропного пирографита по параметрам динамического индентирования / А. П. Крень, Т. А. Протасеня // Дефектоскопия. – 2014. – № 7. – С. 51–59.
- Oliver, W. C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver, G. M. Pharr // J. Mater. Res. – 1992. – V. 7. – P. 1564–1583.
- Анализ способов расчета модуля упругости при динамическом инструментальном индентировании / К. В. Гоголинский // Дефектоскопия. – 2024. – № 7. – С. 72–76.
- Determination of plastic properties of metals by instrumented indentation using different sharp indenters / J. L. Bucaille [et al.] // Acta Materialia. – 2003. – V. 51 (6). – P. 1663–1678.
- Li, Y. Crystal plasticity assessment of the effect of material parameters on contact depth during spherical indentation / Y. Li, W. Jiang, Ž. Božić // Continuum Mech. Thermodyn. – 2020. – V. 35. – P. 729–739.

УДК 621.382

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТИПА ПРОВОДИМОСТИ ПЛАВАЮЩЕГО ЗАТВОРА
НА ПАРАЗИТНОЕ ТУННЕЛИРОВАНИЕ В ЭЛЕМЕНТАХ ФЛЕШ-ПАМЯТИ

Жевняк О. Г.

Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Методом Монте-Карло проведено моделирование переноса электронов в элементах флеш-памяти на основе МОП-транзисторов с плавающими затворами разных типов проводимости. Рассчитаны зависимости величины паразитного туннельного тока от координаты вдоль проводящего канала транзистора. Рассмотрено влияние на них уровня легирования плавающего затвора и показано, что эти зависимости имеют слабо выраженный U-образный вид.

Ключевые слова: элемент флеш-памяти, МОП-транзистор с плавающим затвором, паразитный туннельный ток, метод Монте-Карло.

SIMULATION OF EFFECT OF FLOATING GATE CONDUCTIVITY ON A VALUE OF PARASITIC
TUNNEL CURRENT IN FLASH MEMORY

Zhevnyak O.

Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Electron transport in silicon flash memory elements based on MOSFETs with floating gates with different type of conductivity is simulated by Monte Carlo method. The dependencies of value of parasitic tunnel current along the transistor's channel are calculated. The effect of doping of floating gate on obtained dependencies is considered. It is shown that these dependencies have U-type behavior.

Key words: flash memory cell, MOS-transistor with floating gate, parasitic tunnel current, Monte Carlo simulation.

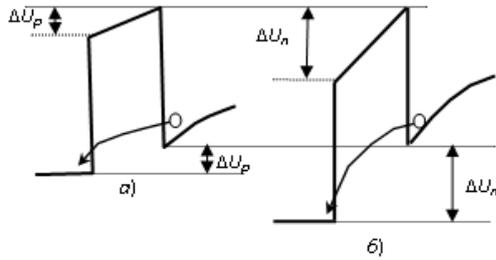
Адрес для переписки: Жевняк О. Г., ул. Коржа, 1, 39, г. Минск 220036, Республика Беларусь
e-mail: zhevnyakog@mail.ru

Введение. Тенденции развития современных флеш-технологий направлены на уменьшение размеров проводящих областей кремниевых МОП-транзисторов с плавающим затвором, хранящим бит информации [1]. Однако, с уменьшением толщины изолирующих слоев и длины проводящих каналов в такого рода приборах заметно усиливается паразитный туннельный ток, что может привести к искажению хранящейся в этих элементах памяти информации (см., например, [2]). Разработка конструкции плавающего затвора – один из способов недопущения этого.

Используемая модель. В настоящей работе нами исследовался короткоканальный n-МОП-транзистор с плавающим затвором, образующий элемент флеш-памяти, со следующими конструктивно-технологическими параметрами: длина канала $L_{ch} = 0,2$ мкм, толщина подзатворного окисла $d_{окс} = 7$ нм, толщина туннельного окисла $d_{тун} = 2$ нм, толщина плавающего затвора $d_{плав} = 2$ нм, глубины залегания истоковой и стоковой областей в подложку $d_j = 50$ нм, концентрация донорной примеси в областях истока и стока $N_D = 10^{26} \text{ м}^{-3}$, напряжения на стоке и затворе $V_D = 2$ В, $V_G = 2$ В. Рассматривались три случая плавающего затвора, созданного на основе кремния p-типа с акцепторной примесью 10^{24} м^{-3} , кремния с собственной проводимостью и, следовательно, с концентрацией электронов 10^{16} м^{-3} , и кремния n-типа с концентрацией электронов 10^{24} м^{-3} .

Паразитный туннельный ток образуют электроны, находящиеся в проводящем канале у границы раздела Si/SiO₂ и туннелирующие на плавающий затвор через туннельный оксид. На рисунке 1 приведена энергетическая диаграмма, поясняющая особенности процесса паразитного туннелирования на плавающий затвор, сформированный из кремния разного типа проводимости. Чем выше концентрация свободных электронов в плавающем затворе, тем ниже расположен уровень дна зоны проводимости в нем и тем больше разница уровней между плавающим затвором и проводящим каналом ΔU . Для плавающего затвора p-типа она минимальна (ΔU_p), для плавающего затвора n-типа она максимальна (ΔU_n). Для плавающего затвора из собственного кремния (на рисунке 1 он не приведен), очевидно, уровень ΔU_i находится точно посередине между ΔU_p и ΔU_n . Тип проводимости плавающего затвора никоим образом не изменяет ни уровень дна зоны проводимости в канале транзистора, ни высоту потенциального барьера на границе Si/SiO₂, ни его ширину, что и отражено на рис.1. Однако, ход потенциала в глубь подложки (слева на рис 1) слегка изменяется, так как изменяется соотношение потенциалов на границе областей с учетом прикладываемого к затвору напряжения.

Значения ΔU_p и ΔU_n зависят от уровня легирования подложки и напряжения на затворе и стоке. В рассматриваемых условиях для $V_D = 0$ В они равнялись около 0,4 В и 1,2 В.



а – для затвора pSi; б – для затвора nSi

Рисунок 1 – Энергетическая диаграмма потенциального барьера на границе Si/SiO₂ в отсутствии напряжения на стоке

Увеличение перепада высот со стороны канала на плавающий затвор для затворов *n*-типа не может не вызвать усиление паразитного туннелирования. Простые аналитические вычисления показывают, что темп туннелирования возрастет с $D(E) \sqrt{\frac{E+\Delta U_p}{E}}$ для плавающих затворов *p*-типа до $D(E) \sqrt{\frac{E+\Delta U_n}{E}}$ для плавающих затворов *n*-типа. Здесь E – энергия туннелирующего электрона, $D(E)$ – коэффициент туннелирования для электрона с данной энергией.

Моделирование влияния типа проводимости плавающего затвора на величину паразитного туннельного тока в настоящей работе осуществлялось с помощью кинетического моделирования методом Монте-Карло электронного переноса в проводящем канале рассмотренного элемента флеш-памяти. Такое моделирование позволяет найти как изменение величины энергии электронов вдоль проводящего канала и рассчитать $D(E)$, так и определить изменения вдоль канала величин ΔU_p , ΔU_i и ΔU_n с помощью самосогласованного решения уравнения Пуассона в канале транзистора и на границе разделов соответствующих областей. Стоит отметить, что напряжение на стоке понижает уровень дна зоны проводимости в канале, а, значит, уменьшает значения ΔU_p , ΔU_i и ΔU_n . Алгоритмы моделирования методом Монте-Карло вместе с самосогласованным решением уравнения Пуассона приведены в нашей работе с соавторами [3]. Процедуры расчета величины $D(E)$ описаны в нашей работе [4].

Результаты моделирования и их обсуждение. На рисунке 2 приведены полученные нами зависимости от координаты вдоль проводящего канала (в направлении от истока к стоку) в рассматриваемых МОП-транзисторах величины

паразитного туннельного тока, полученные для плавающих затворов трех разных типов.

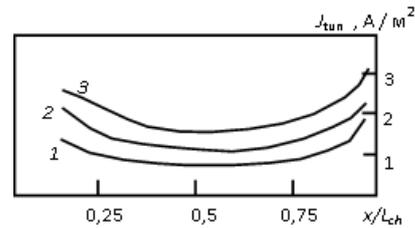


Рисунок 2 – Изменения вдоль проводящего канала элемента флеш-памяти величины паразитного туннельного тока на плавающий затвор, сформированный из кремния *p*-типа (1), собственного кремния (2) и кремния *n*-типа (3)

Анализ поведения кривых позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, полученные зависимости имеют *U*-образный вид. Уменьшение величины тока в направлении от истока к середине проводящего канала связано с уменьшением вдоль канала величины ΔU . Рост же величины тока вблизи стока обусловлен увеличением энергии электрона при их разогреве и увеличением значения $D(E)$. Во-вторых, величина паразитного тока для плавающих затворов *n*-типа в среднем в два раза выше, нежели для затворов *p*-типа.

Заключение. Таким образом, с помощью кинетического моделирования электронного переноса методом Монте-Карло были рассчитаны зависимости вдоль канала величины паразитного туннельного тока. Изучено влияние на них уровня легирования плавающего затвора. Показано, что для *n*-канальных МОП-транзисторов минимальное значение этого тока наблюдается для плавающих затворов, созданных на основе кремния *p*-типа.

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. – V. 41, № 6. – P. 941–951.
3. 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.
4. Жевняк, О. Г. Моделирование влияния глубины залегания стока на паразитные туннельные токи в элементах флеш-памяти / О. Г. Жевняк, В. М. Борздов, А. В. Борздов // Евразийский Союз ученых. Серия: техн. и физ.-мат. науки. 2021. – Т. 1, № 12. – С. 58–61.

УДК.537.226.4-546.65.641

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В СТРУКТУРАХ ТИПА $M_3Ln(EO_4)_2$
Ибрагимов Ш. Б., Мусакаев Р. Р., Умарова М. А., Турабов М.Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Ташкент, Республика Узбекистан

Аннотация. В работе проведены температурно-частотные исследования соединений на основе редкоземельных элементов, определены такие параметры как, время релаксации, длина диполя, энтропия. Показана корреляция полученных параметров в ряду редкоземельных элементов. С помощью метода диэлектрической дисперсии определен поляронный механизм переноса.

Ключевые слова: редкоземельный элемент, частота, диэлектрические потери, диэлектрическая проницаемость, энтропия.

DIELECTRIC RELAXATION IN $M_3Ln(EO_4)_2$ TYPE STRUCTURES
Ibragimov Sh., Musakaev R., Umarova M., Turabov M.Tashkent State Technical University
Tashkent, Republic of Uzbekistan

Annotation. In this work, temperature-frequency studies of compounds based on rare earth elements were carried out, parameters such as relaxation time, dipole length, and entropy were determined. The correlation of the obtained parameters in the series of rare earth elements is shown. Using the dielectric dispersion method, the polaron transfer mechanism was determined.

Key words: rare earth element, frequency, dielectric loss, dielectric constant, entropy.

Адрес для переписки: Ибрагимов Ш. Б., ул. Университетская, 2, г. Ташкент 100095, Республика Узбекистан, e-mail: tstu_info@tdtu.uz

Введение. За последнее время с развитием нанотехнологии, микроэлектроники и материаловедения перспективность получения новых двойных соединений на основе редкоземельных элементов (РЗЭ), элементов I и V группы периодической системы и использования их в науке и технике стало весьма актуальным. Типичными представителями таких перспективных материалов являются двойные и тройные соединения редкоземельных элементов типа $M_3Ln(EO_4)_2$ (где M – K, Rb; Ln-РЗЭ; Э – P, V) для которых отсутствуют сведения об электрических и диэлектрических свойствах.

Методы исследований. Высокое удельное сопротивление ($\rho = 10^{-8} - 10^{-10}$ Ом·см) синтезированных соединений на основе двойных ванадатов редкоземельных элементов $M_3Ln(EO_4)_2$ дает нам возможность применить метод диэлектрической спектроскопии для более глубокого анализа процессов переноса. Для исследования диэлектрических свойств данных материалов были измерены температурно-частотные зависимости диэлектрической проницаемости (ϵ) и тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$). Также, параметром, характеризующим диэлектрические свойства материалов является температурно-частотная зависимость диэлектрических потерь (ϵ'').

Результаты и их обсуждение.

Как показали исследования, наблюдаемые зависимости имеют релаксационный характер, т. е. с повышением температуры максимум потерь сдвигается в область высоких частот. Согласно модели Дебая, температурная зависимость максимумов выражается уравнением в виде

$$\epsilon' = \frac{(\epsilon_c - \epsilon_\infty)\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad (1)$$

где ϵ_c – статическая, а ϵ_∞ – оптическая диэлектрическая проницаемость. Из уравнения (1) видно, что максимум ϵ'' наблюдается при условиях $\omega\tau = 1$. Из зависимости $\ln\omega_{\max}$ от T^{-1} была определена энергия активации процесса релаксации, которая связана с временем релаксации следующим видом

$$\tau = \tau_0 \exp(\Delta E/kT) \quad (2)$$

Вычислены значения ΔE и τ для соединений с различными редкоземельными ионами.

Одним из возможных релаксаторов, создающих потери, описываемые моделью Дебая, как и в случае прыжковой проводимости, является разновалентные ионы ванадия. На этот факт показывает значение энергии активации процесса релаксации (ΔE), которая примерно равна по величине с энергией активации прыжковой проводимости, за счет ионов V^{4+} (W_m) ($\Delta E = 0,25 - 0,35$ эВ, $W_m = 0,3 - 0,4$ эВ) [1].

Появление ионов V^{4+} , как было показано, связано кислородными дефектами - анионными вакансиями, которые возникают в процессе высокотемпературного отжига. Электрическая компенсация этих дефектов происходит благодаря понижению валентности расположенных вблизи с анионной вакансией катионов. И этим создается условие для электронного обмена между соседними с вакансией катионами, что приводит к релаксационной поляризации.

Температурная зависимость диэлектрической проницаемости может служить для исследований степени структурной упорядоченности диэлек-

трика. Как известно свободная энергия A характеризует ту работу, которую система может произвести при постоянной температуре ($A=U-TS$, где U – внутренняя энергия, S – энтропия системы). Рассматривая случай $S = f(T)$ и используя уравнение Максвелла для плотности электрической энергии при поляризации диэлектрика, получим выражение для энтропии

$$S = S_0(T) + d\varepsilon/dT \cdot E^2/8\pi.$$

Отсюда видно, что температурная зависимость диэлектрической проницаемости существенно сказывается на изменении энтропии. Если E увеличивается при нагревании, т. е.

Анализ полученных температурно-частотных зависимостей $\text{tg}\delta$, а вместе с ним и ε'' , в представленных релаксационных процессах согласно положениям Дебая позволил определить ряд параметров, характеризующих данное явление. Так, если представить соотношение в виде

$$\varepsilon'' = \Delta\varepsilon \frac{\omega\tau}{1+(\omega\tau)^2},$$

то параметр $\Delta\varepsilon = \varepsilon_c - \varepsilon_\infty$, называемый релаксационной напряженностью, определяется такими величинами как P -дипольный момент и N -концентрация релаксирующих зарядов [4] с соотношением

$$\Delta\varepsilon = \frac{N^2 p^2}{2E_0 k T}. \quad (4)$$

Таким образом, была определена величина l (в данном случае эффективная длина диполя), которая выражается в виде $P = q \cdot l$, где q – заряд электрона. Длина диполя лежит в пределах от 68 Å до 105 Å в зависимости щелочного металла входящего в состав соединений.

Как известно [2, 3], температурная зависимость диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь может служить для исследований степени структурной упорядоченности твердых тел,

которые связаны с такими термодинамическими параметрами как энтальпия (ΔH) и свободная энергия системы (ΔF). Данная теория ведет к соотношению между временем релаксации (τ) и свободной энергией системы в виде

$$\Delta H = 2,303 RT \lg \left(\frac{kT\tau}{h} \right), \quad (5)$$

где ΔF – свободная энергия активации для дипольной релаксации, k – постоянная Больцмана и h – постоянная Планка. Эти соотношения указывают на построение зависимости $\lg(\tau \cdot T)$ от T^{-1} , которая дает приблизительно прямую линию (отношение наклона которой равен $\Delta H/R$), из которой можно определить значение ΔH .

Используя соотношение (5) можно определить свободную энергию в виде [3].

$$\Delta H = 2,303 RT \lg(kT\tau/h) \quad (6)$$

Из зависимости $\lg(\tau \cdot T)$ от T^{-1} вычислена величина энтальпии активации для соединений как $K_3\text{Ln}(\text{VO}_4)_2$ так и $\text{Rb}_3\text{Ln}(\text{VO}_4)_2$ типа. Как оказалось, наблюдается некоторая корреляция между энтальпией и степенью заполнения $4f$ -орбит редкоземельного иона, а также с видом щелочного металла входящего в состав соединения.

Литература

1. Электрофизические свойства и строение двойных ванадатов лантаноидов / Ш. Б. Ибрагимов // Узб. физ. журн. – 1993. – № 1. – С. 79–81.
2. Панченко, Т. В. Диэлектрическая релаксация в кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_2$: Ст. / Т. В. Панченко, Л. М. Карпова, В. М. Дуда // ФТТ. – 2000. – Т. 42, вып. 4. – С. 671.
3. Денисова, Л. Т. Синтез и исследование высоко-температурной теплоемкости $\text{Sm}_2\text{Ge}_2\text{O}_7$ и $\text{Eu}_2\text{Ge}_2\text{O}_7$ / Л. Т. Денисова, Н. А. Белоусова // Изв. АН РФ, Неорган. – 2018. – Т. 54, № 2. – С. 181–184.
4. Спектры ЭПР V^{4+} в двойных ванадатах P_3O / Ш. Б. Ибрагимов [и др.] // Узб. физ. журн. – 1992. – № 4. – С. 106–107.

УДК 621

УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ СТЕКЛОВИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

Колонтаева Т. В.¹, Сергиевич О. А.², Потонейко А. В.¹

¹ Белорусский национальный технический университет

² Белорусский государственный технологический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В результате выполнения исследовательской работы изучена базовая трехкомпонентная система Al_2O_3 - B_2O_3 - SiO_2 . С целью синтеза и изучения свойств и микроструктуры стекловидных функциональных покрытий. Особое внимание уделено изучению влияния оксидов-модификаторов на основные свойства покрытий. Изучена кристаллизационная способность опытных составов стекол, а также основные физико-химические свойства стекол. Подобраны оптимальные режимы термообработки составов. Установлено влияние температуры и продолжительности обработки на микроструктуру покрытий. Изучен фазовый состав оптимальных составов и микроструктура. Сформулированы особенности формирования промежуточной зоны «покрытие-подложка». Проведен термодинамический анализ трехкомпонентной диаграммы состояния в области исследуемых составов.

Ключевые слова: стекловидные покрытия, кристаллизация, стеклообразование, микроструктура.

CONTROL OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF VITREOUS COATINGS

Kolontaeva T.¹, Sergievich O.², Potoneiko A.¹

¹Belarusian National Technical University

²Belarusian State Technological University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. As a result of the research work, the basic three-component Al_2O_3 - B_2O_3 - SiO_2 system was studied. For the purpose of synthesis and study of properties and microstructure of vitreous functional coatings. Particular attention is paid to the study of the effect of oxide modifiers on the basic properties of coatings. The crystallization ability of experimental glass compositions was studied, as well as the basic physicochemical properties of glasses. Optimal modes of heat treatment of compositions are selected. The effect of temperature and processing duration on the microstructure of coatings has been established. Phase composition of optimal compositions and microstructure were studied. Features of formation of intermediate zone «coating-substrate» are formulated. Thermodynamic analysis of the three-component state diagram in the area of the test compositions was performed.

Keywords: vitreous coatings, crystallization, glass formation, microstructure.

Адрес для переписки: Колонтаева Т. В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: tatkolontaeva@mail.ru

Разработка новых функциональных покрытий различного назначения является по-прежнему актуальной задачей в области материаловедения. Создание недефицитных и экономически выгодных легкоплавких покрытий представляет несомненный интерес. Особенно в случае ограниченных возможностей использования некоторых сырьевых ресурсов в Республике Беларусь.

Для достижения основной цели исследования был проведен критический обзор литературных источников в области синтеза стекловидных покрытий. Особое внимание было уделено изучению процесса формирования микроструктуры стекловидной матрицы и влияние состава стекла на основные свойства стекловидных покрытий.

При анализе обзора литературных данных установлено, что на микроструктуру материалов большое влияние оказывает координационное состояние химических элементов.

С целью обоснования выбора области химических составов стекол в работе проведен термодинамический анализ трехкомпонентной диаграммы состояния в области исследуемых составов. На

рисунке 1 представлена диаграмма состояния трехкомпонентной системы Al_2O_3 - B_2O_3 - SiO_2 .

Систему изучали Гилиссе и Фостер [1]. На диаграмме приблизительно отмечены поля кристаллизации двойных химических соединений, образующихся в трехкомпонентной системе. Есть предположение, что между двойными соединениями имеют место твердые растворы.

Для исследования выбрана область системы Al_2O_3 - B_2O_3 - SiO_2 . Соотношение вводимых оксидов варьируется в следующих пределах (мол. %): SiO_2 50–62,5; B_2O_3 5–17,5 и Al_2O_3 5–15. В качестве модифицирующих оксидов использовали CaO (в пределах 7,5–15 %), Na_2O (6–13,5 %) и ZrO_2 (4,0%).

При расчете составов шихт учтено улетучивание оксида бора в процессе синтеза в количестве 12,5 %. Стекла были сварены в газовой печи при температуре 1350 °С с выдержкой при максимальной температуре в течение 2 часов в фарфоровых тиглях. Для синтеза стекол в качестве сырьевых материалов использовались: обогащенный кварцевый песок для введения SiO_2 , глинозем, а также химические реактивы квалификации «ч» и «чда»,

а именно Na_2O , CaCO_3 , H_3BO_3 . Диоксид циркония вводился циркониевым концентратом.

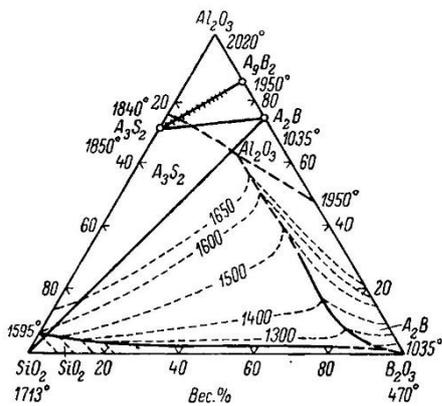


Рисунок 1 – Диаграмма состояния

При исследовании стеклообразующей и кристаллизационной способности стекол системы установлено получение стекол трех видов: прозрачные, частично заглушенные хлопьевидными включениями и полностью глухие стекла. Особенностью стекол данной системы является их склонность к ликвации, которая, как и кристаллизация, является самостоятельным фазовым превращением и, как правило, предшествует кристаллизации. Ликвационное разделение приводит к изменению химического состава и появлению неоднородностей. Для определения состава фаз ликвирующих стекол был проведен рентгеноспектральный анализ элементного состава фаз с помощью микрозонда для матричной и капельной фазы. Матричная фаза сформирована алюмосилкатной составляющей. Капельная фаза представляет собой низкокремнеземистую кальциево-боратную составляющую.

Стекловидное покрытие и подложка всегда являются гетерофазными материалами, которые отличаются физико-химическими свойствами, степенью упорядоченности структуры, между которыми при контакте в условиях повышенных температур происходит определенное взаимодействие, которое может представлять собой самодиффузию катионов, массоперенос путем вязкого течения расплава стекла и размягчающейся стеклофазы керамической подложки или химическое взаимодействие между расплавом и кристаллическими фазами, а также образование новых соединений.

Необработанное стекловидное покрытие динамически неустойчиво и обладает большим запасом свободной энергии из-за большой удельной поверхности составляющих его частиц. Стремле-

ние уменьшить величину свободной энергии выражается в уплотнении структуры покрытия. Если в период нагрева адгезия покрытия с подложкой имеет поверхностный характер, то с момента затвердевания покрытия протекают процессы растворения составных частей керамики и газовыделение. Промежуточный слой между двумя материалами формируется в результате диффузионных процессов в системе «кристаллическое вещество–стеклофаза–расплав».

Известно, что стекловидные тела имеют структуру более компактную, более свободную, чем кристаллические. При изменении химического состава стекла меняется, как число ионов, участвующих в диффузии, так и их подвижность. Энергия активации диффузии зависит от структурного строения стекла, причем диффузия ускоряется, если на стекло действуют растягивающие усилия. Такие усилия возникают при определенной разнице температурных коэффициентов линейного расширения компонентов, составляющих систему. Следовательно, диффузионные процессы в гетерофазной системе стекло-керамика идут, в основном, за счет стекла. Взаимодействие стекла и керамики представляет собой сложный многофакторный физико-химический процесс и изучение его механизма, а также оптимизация условий проведения позволяет получать высококачественные функциональные стеклообразные покрытия. Применение микрорентгеноспектрального анализатора с электронным зондом позволяет изучить взаимную диффузию с локальностью 1 мкм.

Изучение процессов в контактном слое «стеклообразное покрытие-керамическая подложка» проводилось с помощью поперечных сколов на электронном зонде MS-46 «Сатеса» (Франция). Сканирование осуществляли с записью концентрационных кривых распределения компонентов. Было исследовано распределение ионов алюминия, кальция, кремния и циркония.

В результате проведенного научного исследования синтезированы стеклообразные покрытия с улучшенными физико-химическими и механическими свойствами, оптимизированы температурно-временные режимы процесса, разработана технологическая схема с указанием операций контроля параметров, изучены свойства и структура покрытий.

Литература

1 Торопов, Н. А. Диаграммы состояния силикатных систем: справочник. – Выпуск 3 / Н. А. Торопов. – Л.: Наука. – 1969. – 372 с.

УДК 538.9+539.23

СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ TiAlCuN ДЛЯ ТЕРМОРЕЗИСТИВНЫХ ДАТЧИКОВ

Константинов С. В.², Зайков В. А.¹, Комаров Ф. Ф.²,
Лобанок М. В.¹, Михаленок А. А.¹, Романов И. А.¹

¹Белорусский государственный университет

²НИИУ «Институт прикладной физики проблем имени А. Н. Севченко» БГУ

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе проведено исследование электрофизических свойств покрытий $Ti_{1-x}Al_xCuN$, осажденных на кремнии и SiO_2 методом реактивного магнетронного распыления из композитных мишеней с различным соотношением Al/Ti. Структура и компонентный состав пленок исследовались методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС). Электрофизические характеристики тонкопленочных покрытий $Ti_{1-x}Al_xCuN$ на SiO_2 измеряли четырехзондовым методом с помощью измерителя удельных сопротивлений (ИУС-3), а температурные зависимости сопротивления структур $Ti_{1-x}Al_xCuN/SiO_2$ определяли двухзондовым методом с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-6. Обнаружено, что структуры $Ti_{1-x}Al_xCuN/SiO_2$ в диапазоне $0,33 < x = Al/(Al+Ti) < 0,62$ имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления (ТКС) и таким образом являются перспективными для разработки высокотемпературных термисторов с отрицательным ТКС.

Ключевые слова: реактивное магнетронное распыление, сканирующая электронная микроскопия, температурный коэффициент сопротивления, термистор.

PROPERTIES OF NANOSTRUCTURED COATINGS OF TiAlCuN FOR THERMORESISTIVE SENSORS

Konstantinov S.², Zaikov V.¹, Komarov F.², Lobanok M.¹, Mikhalenok A.¹, Romanov I.¹

¹A. N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physics Problems BSU

²Belarusian State University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The paper studies the electrophysical properties of $Ti_{1-x}Al_xCuN$ coatings deposited on SiO_2 by reactive magnetron sputtering from composite targets with different Al/Ti ratios. The structure and component composition of the films were studied by scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDXS). The electrophysical characteristics of $Ti_{1-x}Al_xCuN$ thin films coatings on SiO_2 were measured by the four-probe method using a resistivity meter (IUS-3), and the temperature dependences of the resistance of $Ti_{1-x}Al_xCuN / SiO_2$ structures were determined by the two-probe method using an IPPP 6 semiconductor device parameter meter. It was found that $Ti_{1-x}Al_xCuN/SiO_2$ structures in the range of $0.33 < x = Al/(Al+Ti) < 0.65$ have a negative temperature coefficient of resistance (TCR) and are thus promising for the development of high-temperature thermistors with negative TCR.

Key words: reactive magnetron sputtering, scanning electron microscopy, temperature coefficient of resistance, thermistor.

Адрес для переписки: Зайков В.А., ул. Курчатова, 5, г. Минск 220064, Республика Беларусь

e-mail: valery48@tut.by

Введение. Керамические покрытия нитридов переходных металлов, в частности, $TiAlN$, $TiAlSiN$ и $TiAlCuN$, полученные методом реактивного магнетронного распыления, широко используются в авиационной и космической технике [1]. В работе [2] показано, что нитрид титана-алюминия ($TiAlN$), обладая превосходными механическими свойствами, является перспективным материалом для создания высокоэффективных термисторов с отрицательным ТКС. Этому способствует высокая адгезионная прочность и устойчивость $TiAlN$ к окислению. Добавление меди в состав покрытия $TiAlN$ уменьшает размер кристаллитов и препятствует миграции границ зерен [1].

В настоящей работе исследуются электрофизические свойства наноструктурных нитридных покрытий $TiAlCuN$ и рассматриваются возможно-

сти использования структур на их основе для создания термисторов, работающих при повышенных температурах.

Материалы и методы исследований. Формирование покрытий $TiAlCuN$ осуществлялось реактивным магнетронным распылением из двух мишеней с соотношением атомных долей $Ti / Al = 1:1$ в первой и $Ti / Al = 3:1$ во второй мишени. Осаждение проводилось по методике работы [3] как в режиме стехиометрии ($\alpha = 0,60$), так и режиме с дефицитом реактивного газа ($\alpha = 0,47$) на образцы размером 20 мм x 15 мм вырезанные из пластин кремния марки КЭФ-4 (100) и на образцы кремния со слоем SiO_2 , выращенным термическим окислением.

Результаты исследований. Состав покрытий в зависимости от параметра α приведен в

таблице 1. Первая цифра в обозначении образцов соответствует номеру распыляемой мишени, а последняя цифра определяет параметр α и стехиометрическое соотношение $(Ti + Al)/(N)$.

Таблица 1 – Стехиометрический состав покрытий

N°	α	Ti/Al	Al/(Ti + Al)	$(Ti + Al)/(N)$
1N1	0,60	0,91	0,62	0,99
1N2	0,47	0,65	0,61	1,24
2N1	0,60	2,06	0,33	0,99
2N2	0,47	3,33	0,23	1,79

Для всех образцов покрытий характерна столбчатая структура, с небольшим увеличением диаметра столбцов по мере роста покрытий. Средний размер зерна не превышает 30 нм для покрытий $(Ti + Al)/(N) \approx 1,0$ и ($\alpha = 0,60$) а для покрытий $(Ti + Al)/(N) > 1,2$ и ($\alpha = 0,47$) средний размер зерна меньше 20 нм.

В таблице 2 представлены результаты электрофизических измерений четырехзондовым методом, и с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-6. Измерения проводили на структурах $Ti_{1-x}Al_xCuN/SiO_2$, толщина слоя SiO_2 равнялась 0,44 мкм. Обозначения в таблице: R_{\square} – слоевое сопротивление; h – толщина; ρ – удельное сопротивление.

Таблица 2 – Электрофизические параметры покрытий

N° п/п	R_{\square} , Ом/□	h , мкм	ρ , мкОм·см	ТКС
1N1	33,57	1,90	6378	отрицат.
1N2	5,37	1,29	692	отрицат.
2N1	2,98	1,31	388	положит.
2N2	1,20	1,30	156	положит.

Наибольшие значения слоевого и удельного сопротивлений наблюдались у образцов 1N1, которые также имели максимальный отрицательный ТКС. На рисунке 1 представлены зависимости сопротивления и температуры от времени.

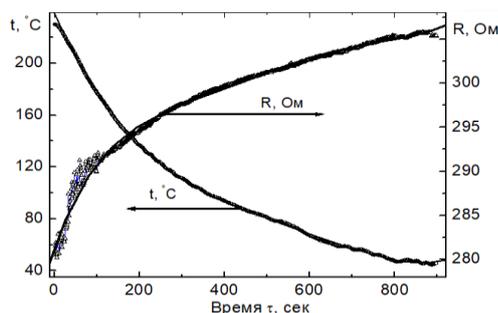
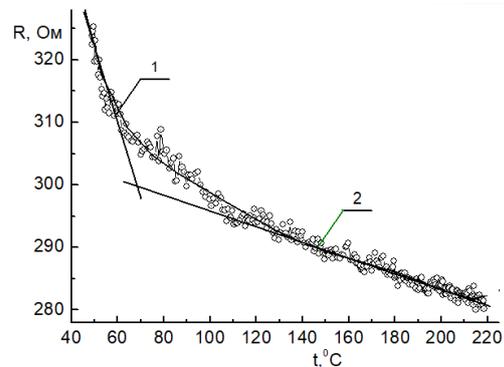


Рисунок 1 – Зависимость сопротивления и температуры образца 4N1 от времени

Измерения проводили по двухканальной схеме. К входу ИИД1 прибора ИППП-6 подклю-

чали контакты для подачи постоянного напряжения ($3,000 \pm 0,002$) В и проводили измерение тока в реальном масштабе времени Ко входу ИИД2 подключалась термопара.

На рисунке 2 приведена зависимость сопротивления образца от температуры.

Рисунок 2 – Зависимость сопротивления образца 4N1 покрытия $TiAlCuN$ от температуры

На участке 1 среднее значение ТКС равно $3,2 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, на участке 2 значение ТКС равно $4,5 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Полученные значения сопоставимы с результатами, приведенными в работе [2].

Заключение. Максимальное значение ТКС в структурах $Ti_{1-x}Al_xCuN/SiO_2$, наблюдалось для стехиометрического состава $(Ti + Al)/(N) \approx 1,0$ и содержании алюминия $x = Al/(Al + Ti) = 0,62$.

В работе [2] максимальное значение ТКС соответствовало интервалу $0,46 < x < 0,69$, при этом кристаллическая структура соответствовала гранцентрированной кубической решетке. Предполагаемый механизм проводимости [2] основан на прыжках электронов, а сопротивление границ зерен более значимо при низких температурах. В работе показано, что материал $TiAlCuN$ перспективен для разработки термистора с отрицательным ТКС.

Литература

1. Константинов, С. В. Влияние режимов нанесения наноструктурированных нитридных и карбонитридных покрытий на их структуру, оптические и электрофизические свойства / С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. В. Чижов // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2024. – № 2. – С. 69–83.
2. Expanding the applications of the wear-resistant titanium aluminum nitride thin-film to include temperature sensing / Bruno Martins [et al.] // Journal of Science: Advanced Materials and Devices. – 2024. – Т. 9. – №. 2. – С. 100716.
3. Климович, И. М. Система контроля расхода газов для применения в технологии реактивного магнетронного распыления / И. М. Климович В. Н. Кулешов, В. А. Зайков // Приборы и методы измерений. – 2015. – Т. 6, № 2. – С. 139–147.

УДК 620.182.25+ 621.923.12

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ПОЛИРОВАЛЬНОЙ СУСПЕНЗИИ НА ПРОЦЕСС ХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКОГО ПОЛИРОВАНИЯ ПОДЛОЖЕК SiC

Корякин С. В.¹, Михаленок Е. В.¹, Дубовик И. Н.², Гайко М. И.¹, Серокурова А. И.³

¹НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь

²Филиал «Камертон» ОАО «ИНТЕГРАЛ»
Пинск, Республика Беларусь

³ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе рассмотрен вопрос влияния состава полировальной суспензии на ХМП поверхности пластин 4H-SiC. Показано, что использование сильных окислителей в составе коллоидной суспензии позволяют увеличить эффективность обработки и улучшения качество обработки поверхности пластин 4H-SiC.

Ключевые слова: пластины SiC, химико-механическое полирование, окисление поверхности.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE COMPOSITION OF THE POLISHING SUSPENSION ON THE PROCESS OF CHEMICAL-MECHANICAL POLISHING OF SiC WAFERS

Koriakin S.¹, Mikhalenok E.¹, Dubovik I.², Gayko M.¹, Serokurova A.³

¹A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus

²Kamerton Branch of OJSC Integral
Pinsk, Republic of Belarus

³State Scientific and Production Association "Scientific and Practical Center of the NAS of Belarus for Materials Science"
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article considers the effect of the composition of the polishing suspension on the process of chemical-mechanical polishing of the surface of 4H-SiC wafers. It is shown that the use of strong oxidizing agents in the composition of a colloidal suspension can increase the processing efficiency and improve the surface treatment quality of 4H-SiC wafers.

Keywords: 4H-SiC wafers, chemical-mechanical polishing, surface oxidation.

Адрес для переписки: Корякин С. В., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: nil28@mail.ru

В работе рассмотрен вопрос влияния состава полировальной суспензии на процесс химико-механического полирования (ХМП) поверхности пластин монокристаллического карбида кремния 4H-SiC, что позволяет увеличить эффективность обработки и способствует улучшению качества поверхности ХМП практически всегда используется в процессе финишной обработки поверхности полупроводниковых подложек с целью уменьшения шероховатости поверхности и минимизации дефектов в приповерхностном слое. Во время ХМП поверхность подвергается циклам химического окисления и механического удаления поверхностных слоев при взаимодействии между пластиной, полировальной суспензией и полировальником [1]. Учитывая высокую твердость и сильную химическую инертность 4H-SiC, ХМП пластин 4H-SiC сталкивается с проблемами длительного времени обработки, высокой стоимости и низкой технической гибкостью [2].

Известно, что качество финишной обработки поверхности пластин зависит от методов и способов обработки, используемых на предыдущих этапах. В данной работе предварительная и фи-

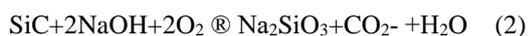
нишная полировки проводились на станках SpeedFam PW50Spaw-III «1500 SSP», СДП-100 и экспериментальном оборудовании для ХМП, разработанном на базе станка METAPOL 1000X, с использованием полировальных кругов Siegal и Hasonor EB (HS). Геометрические параметры пластины (клин, изгиб и толщина) измерялись индукционным методом с применением измерителя толщины, клина и прогиба 09ЭР-2,5-004. Параметр глубина нарушенного слоя h определяли по ступеньке на профилемере после полного удаления нарушенного слоя химическим травлением в щелочи. Параметр шероховатости R_a измерялся методом АСМ с использованием сканирующего зондового микроскоп NanoEducator NT-MDT с полем сканирования 20×20 мкм.

Скорость удаления материала (СУМ) при полировании напрямую зависит от используемой суспензии, абразивного материала, применяемых полировальных кругов, режимов обработки. На этапе предварительной полировки (станок СДП-100, METAPOL 1000X), использовались суспензии на основе глицерина с применением алмазных порошков различной зернистостью (10/7, 5/3, 3/2,

1/0) в качестве абразива. Такой подход позволил быстро сформировать геометрию подложки, выйти на требуемую толщину пластины 500 ± 25 мкм с средней СУМ $6\text{--}12$ мкм/ч., минимизировать величину приповерхностного структурно-нарушенного слоя до $3\text{--}5$ мкм и получить шероховатость Ra до $1\text{--}2$ нм. Дальнейшее уменьшение размеров абразивного материала, использование водной суспензий с использованием ультрадисперсных детонационных наноалмазов размером $8\text{--}30$ нм (УДА), не привели к заметному изменению морфологии поверхности и толщины пластин. Дальнейшая обработка пластин 4H-SiC требует использования химических реактивов.

Традиционные методы ХМП при производстве полупроводниковых пластин с использованием растворов суспензий на основе SiO₂ Nalco PS 2360, PS 2358, SD10040 (pH 10,5–12,0, щелочи в качестве окислителя, температуры суспензии $40\text{--}45$ °C) не дали заметного результата в измерении морфологии поверхности пластин 4H-SiC. Добавление в суспензию алмазных порошков, порошков SiC (7/10) и Al₂O₃ в качестве абразивного материала позволяют получить приемлемые для готовых пластин 4H-SiC параметры шероховатости, глубины нарушенного слоя и количество царапин на поверхности.

Предлагаемая в [2] модель ХМП основана на том, что окислитель в полировальной суспензии сначала окисляет 4H-SiC, образуя переходное состояние окисления Si-C-O на поверхности. Оксид имеет более низкую твердость, чем 4H-SiC, что гарантирует его удаление абразивами в суспензии посредством механического воздействия. На основе циклирования окисления и механического удаления реализуется планаризация пластины 4H-SiC. При реализации данной модели используются окислители такие как пероксид водорода (H₂O₂), перманганат калия (KMnO₄) и катализатор FeO в реакции Фентона [2]. Основная химическая формула, описывающая процесс окисления поверхности пластин 4H-SiC выглядят следующим образом (1), где важную роль в эффективности процесса окисления играет концентрация гидроксидрадикалов (OH) формируемых в суспензии при химическом взаимодействии реагентов. Также возможно протекание реакции по формуле (2).



Нами проведены исследования и предложены суспензии, позволяющие увеличить эффективности процесса ХМП. Для окисления поверхности

4H-SiC были изготовлены коллоидные смеси, в которых реализована реакция Фентона с использованием CuO в качестве катализатора. Основой суспензий являлся водный раствор Nalco PS 2360 1:10. В качестве окислителя использовался водный раствор KMnO₄ с добавлением NaNO₂ (pH = 11–12). В качестве абразива использовались SiO₂, алмазный порошок 3/2 и порошок Al₂O₃. Суспензии подавались на полировальник со скоростью 1 капл/с. По отдельному каналу подавалась H₂O₂ со скоростью 1 капл/с. Во всех вариантах ХМП скорость вращения полировального диска была равна 30 об/мин, скорость вращения диска с образцами 80 об/мин, давление на пластины – $0,5\text{--}0,8$ кг/см², вращение кругов в противоположных направлениях. Время процесса ХМП ~ 1,5 ч. Использование коллоидных суспензий, обогащенных окислителем, позволили достигнуть минимальные значения шероховатости (~ 0,5 нм) при скорости удаления материала $1\text{--}2$ мкм/ч, возможно, являются предельными значениями для этих методов полирования.

Так же был реализован способ окисления поверхности пластин 4H-SiC облучением поверхности низкоэнергетическими пучками ионов кислорода с энергией ионов $400\text{--}600$ эВ и плотностью тока пучка ионов до $0,5$ мА/см². Данный процесс был реализован на установке вакуумного напыления-облучения, оснащенный источником ионов кислорода самостоятельного двухкаскадного разряда с холодным полым катодом [3]. В процессе облучения на поверхности произошло сглаживание микровыступов, планаризация поверхности и формирование окисленного слоя толщиной десятки нанометров. Это позволило снизить время обработки до 30 мин при дальнейшей обработке пластин методом ХМП и получить шероховатость менее 1 нм.

Благодарности. Исследование выполнено за счет средств Научно-технической программы Союзного государства «Компонент Ф» и гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований T23PHФ-010.

Литература

1. Ивенин, С. В. Обработка пластин монокристаллического карбида кремния / С. В. Ивенин // Вестник Мордовского университета. – 2015. – Т. 25, № 4. – С. 37–50.
2. Chemical-Mechanical Polishing of 4H Silicon Carbide Wafers / Wantang Wang [et al.] // Adv. Mater. Interfaces. – 2023. – V. 10.
3. Stognij, A. I. A Wide-Aperture Source of Oxygen Ions with a Hollow Cold Cathode and Magnetic Multicast / A. I. Stognij, S. V. Koryakin // Instruments and Experimental Techniques. – 2000. – V. 43. – P. 783–786.

УДК 678.057.9

**ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ
ИЗ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ЭПОКСИДНЫХ СИСТЕМ**
**Ксенофонтов М. А., Васильева В. С., Выдумчик С. В., Гавриленко О. О.,
Горохов С. Л., Калашников А. С., Павлюкевич Т. Г.**

*НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе представлено промышленное оборудование для изготовления изделий из эпоксидного пенопласта ПЭ-9 с использованием импульсной заливки двухкомпонентной системы с замешиванием фреона в смолу. Машина предназначена для соблюдения жестких технологических требований при подготовке, дозировании, смешении и заливки двухкомпонентных полимерных систем, гарантирует получение высококачественных изделий, а также позволяет избежать возможных ошибок за счет применения автоматизации технологического процесса. Изделия из эпоксидного пенопласта применяются в качестве герметизирующего, электроизоляционного и конструкционного материала в различных отраслях промышленности, где необходимы материалы, стойкие к ударному, вибрационному и другим механическим воздействиям.

Ключевые слова: промышленное оборудование, эпоксидный пенопласт, импульсная заливка двухкомпонентных систем, автоматизация технологического процесса.

EQUIPMENT FOR PRODUCING PRODUCTS FROM TWO-COMPONENT EPOXY SYSTEMS

**Ksenofontov M., Vasilyeva V., Vydumchik S., Gavrilenko O.
Gorokhov S., Kalashnikov A., Pavlyukevich T.**

*A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of BSU
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The paper presents industrial equipment for manufacturing products from epoxy foam plastic PE-9 using pulse pouring of a two-component system with mixing of freon into the resin. The machine is designed to meet strict technological requirements during preparation, dosing, mixing and pouring of two-component polymer systems, guarantees the production of high-quality products, and also allows avoiding possible errors due to the use of automation of the technological process. Products made of epoxy foam plastic are used as a sealing, electrical insulating and structural material in various industries where materials resistant to impact, vibration and other mechanical effects are required.

Key words: industrial equipment, epoxy foam, pulse pouring of two-components systems, process automation.

*Адрес для переписки: Ксенофонтов М. А., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: lab_doзатор@mail.ru*

Отличная адгезия ко многим материалам, хорошие диэлектрические свойства, небольшая усадка при отверждении, высокая химическая стойкость способствуют широкому внедрению эпоксидных полимеров в различные области науки и техники [1].

Изделия из эпоксидного пенопласта имеют прочную закрытоячеистую структуру низкой плотности, благодаря чему удается значительно снизить массу изделия по сравнению с использованием стандартных компаундов. Данный материал активно применяется в качестве герметизирующего, электроизоляционного и конструкционного материала в приборостроении, радиотехнической, электронной и других отраслях промышленности, где необходимы материалы, стойкие к температурным нагрузкам, ударному, вибрационному и другим механическим воздействиям.

В работе представлено промышленное оборудование (рисунок 1) для изготовления изделий из эпоксидного пенопласта ПЭ-9 с использованием импульсной заливки двухкомпонентной системы с замешиванием фреона в смолу.

В основу работы оборудования положен принцип импульсной подачи дозированного количе-

ства двух жидких компонентов (смолы и отвердителя) в смесительную головку с динамическим перемешиванием и последующей заливкой смеси в форму. Процесс смешения компонентов осуществляется в проточной малогабаритной смесительной камере за счет механической энергии, благодаря высокой скорости вращения смесительного элемента.

Разработанное нами оборудование характеризуется модульной конструкцией узлов. Благодаря данной особенности машина конфигурируется в индивидуальном порядке, в строгом соответствии с производственными задачами конкретного предприятия [2].

Оборудование состоит из следующих функциональных частей. На раме установлены емкости для смолы и отвердителя, мерник для хладона (обеспечивает подачу необходимой по рецептуре порции фреона в емкость смолы), термостат, шкаф управления, комплект соединительных шлангов (линия подачи эпоксидной смолы (компонент А), линия подачи отвердителя (компонент Б), линии подачи хладона и азота). Плита с дозирующими насосами смолы, отвердителя и общим приводом от электродвигателя с цепной переда-

чей расположены под рабочим столом. Над рабочим столом размещается пульт управления, а также закреплен кронштейн со смесительной головкой. Для удобства перемещения по цеху ручную установка имеет опорные катки с интегрированным тормозом. Управление работой дозатора и контроль параметров технологического процесса осуществляется с пульта управления. Сетевые кнопки включения дозатора, а также элементы управления термостатом располагаются на двери шкафа управления.



Рисунок 1 – Машина для импульсной заливки полимерных двухкомпонентных эпоксидных систем

Преимуществами представленной разработки являются собственное проектирование и производство, а динамическое перемешивание компонентов при высоком давлении способствует удержанию вспенивающего агента в композиции. Давление в головке во время заливки создается путем уменьшения зазора между корпусом сопла и винтом. Контроль давления осуществляется по манометру в линии нагнетания отвердителя, расположенному на раме справа от смесительной головки, или по показаниям датчика давления на индикаторе пульта управления.

Синхронизированная подача смолы и отвердителя в смесительную головку достигается использованием общего приводного электродвигателя с частотным регулированием посредством цепной передачи. Такой тип привода дозирующего устройства обеспечивает фиксированные скорости вращения валов дозирующих насосов, а следовательно, и фиксированное соотношение подачи смола/отвердитель. Изменение соотношения можно осуществлять заменой звездочек привода насоса смолы. Предусмотрена возможность регулировки частоты вращения приводного электродвигателя посредством изменения частоты на преобразователе частоты, установленного в шкафу управления.

Применение в емкости смолы перемешивающего устройства с приводной магнитной муфтой позволяет без дополнительных уплотняющих элементов приготовить эпоксидную многокомпонентную композицию в условиях высокого давления и температуры. Использование жидкостного термостатирующего устройства для равномерного разогрева и поддержания температуры смолы в рабочей емкости, дозирующем насосе и подающем рукаве обеспечивает гомогенизацию материала. В качестве теплоносителя используется антифриз на основе пропиленгликоля любой марки. Допускается применять дистиллированную воду ГОСТ 6709.

Благодаря уникальным инженерно-конструкторским решениям с соблюдением требований высокотехнологичных производств и применением современных материалов, разработка отличается удобством и простотой эксплуатации, минимизирует участие человека в производственно-технологическом процессе, позволяет перерабатывать сложные полимерных системы, гарантирует получение высококачественных изделий, а также позволяет избежать возможных ошибок за счет применения автоматизации технологического процесса, рекомендуемого производителями сырья.

При проектировании оборудования используются самые современные стандарты качества и передовые технологии, обеспечивающие переработку материалов в соответствии с технологическими регламентами и паспортными характеристиками. Заказчик получает готовое комплексное техническое решение, включающее компетентную помощь в подборе оборудования, разработку технологии, подбор материала и производство опытных образцов изделий, доставку оборудования, пуско-наладочные работы, сервисное обслуживание.

Современное автоматизированное оборудование позволяет получать изделия из многокомпонентных эпоксидных систем, отвечающие самым строгим общепринятым стандартам и требованиям. Весь производственный процесс может выполняться на одной единице оборудования, поэтому данная технология является универсальной для различных сфер промышленности. Компактность и простота в обслуживании позволяет значительно снизить трудозатраты и увеличить производительность, сократить издержки и долю ручного труда на предприятии.

Литература

1. Иржак, В. И. Эпоксидные полимеры и композиты с эпоксидной матрицей / В. И. Иржак. – М.: РАН, 2022. – 288 с.
2. От земных проблем до космических / П. В. Кучинский [и др.]. – Минск: РИВШ, 2021. – 364 с.

УДК 621.7.029

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС СВЧ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ

Кудина А. В.¹, Франко Е. П.¹, Барковская К. Н.¹, Есьман Г. А.²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Плазменные технологии в силу наличия большого количества достоинств широко применяются в производстве устройств электронной техники. В данной статье речь пойдет о технологии плазмохимического травления при использовании СВЧ разряда, выборе фоторезиста и оборудования для выполнения следующего технологического процесса.

Ключевые слова: СВЧ плазма, травление, фоторезист, плазмохимические технологии, плазмотрон.

TECHNOLOGICAL PROCESS OF MICROWAVE PLASMOCHEMICAL ETCHING

Kudina A.¹, Franko E.¹, Barkovskaya K.¹, Esman G.²

¹BelaRussian Federation State University of Informatics and Radioelectronics

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Plasma technology is widely used in the production of electronic devices due to its many advantages. This article has information about plasma chemical etching technology using microwave discharge, the choice of photoresist and equipment for the following technological process.

Key words: microwave plasma, etching, photoresist, plasmochemical technologies, plasmatron.

Адрес для переписки: Барковская К. Н., ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220089, Республика Беларусь
e-mail: k.barkovskaia@bsuir.by

Плазменные технологии в последнее время являются важным инструментом в производстве микроэлектронных устройств. По мере развития плазменных технологий различные методы обработки поверхностей с помощью плазмы стали использоваться и в других отраслях, включая автомобилестроение, медицинское оборудование, текстиль и авиакосмическая отрасль.

Сегодня плазменная технология регулярно используется для: очистки и обработки поверхностей внутренних и внешних деталей автомобиля, для улучшения адгезии краски и других покрывающих материалов, для придания отталкивающих свойств текстильным материалам, для очистки и обработки фильтров, игл шприцов, катетеров для ангиопластики, контактных линз, высоковольтных разъемов питания и многое другое.

Выбирая правильные параметры обработки, можно сделать: плазменную очистку, плазменную активацию поверхности, плазменное осаждение, плазменное травление.

Плазменные технологии обладают следующими достоинствами:

- возможность обрабатывать сложные 3D-объекты и микроканалы;
- экологически чистая технология, без отходов химикатов;
- гибкая настройка процесса для придания поверхности специфических свойств;
- способность обрабатывать чувствительные к температуре материалы;
- возможность обрабатывать проводники, полупроводники и изоляторы и пр.;
- низкая стоимость обработки;

– возможность производить продукцию с высокой добавленной стоимостью по отношению к продукту и др. [1].

Плазменное травление заключается в снятии материала с поверхностей с использованием плазменных процессов. Его называют также сухим травлением – в контрасте с традиционными мокрыми процессами травления, в которых используются агрессивные кислоты. Плазма технологических газов преобразовывает протравливаемый материал из твердого в газообразное агрегатное состояние, а вакуумный насос отсасывает газообразные продукты. Метод маскирования позволяет выполнять травление лишь отдельных участков или структур. Плазменное травление выполняется только в плазме низкого давления. Это обусловлено тем, что заметный эффект травления достигается путем длительной обработки, и все травящие газы могут использовать только в плазме низкого давления [2].

Существует 3 метода выполнения плазменного травления:

1. Ионное травление. Удаление поверхностных слоев материала происходит под воздействием ускоренных ионов.
2. Ионно-химическое травление. Для удаления поверхностных слоев материала используют как бомбардировку ускоренными ионами, так химическое взаимодействие с компонентами плазменного разряда.
3. Плазмохимическое травление. Удаление поверхностных слоев материала осуществляется за счет их взаимодействия с радикалами, образованными в плазменном разряде [3].

Особенности СВЧ плазмы. СВЧ разряд по-является в результате возникновения пробивного напряжения и лавинной ионизации плазмообразующего газа (воздух, пар, инертные газы, водород, кислород и др.), а также в результате формирования плазменного сгустка.

СВЧ плазма – это комбинация СВЧ разрядов, генерируемых электромагнитными волнами, значение частоты которых превышает значение 300 МГц [4].

Достоинствами СВЧ разряда являются простота получения плазмы, высокий уровень значения энергии плазмы и широкий диапазон значений давления воздуха [5]. Плазма используется во множестве процессов производства полупроводниковых устройств. Значимую роль играет тот факт, что плазма не нагревается. Поэтому полупроводниковые пластины, которые уже металлизированы, могут быть обработаны с помощью плазмы [6].

СВЧ-плазма с ее ярко выраженным химическим характером воздействия на материал обеспечивает «мягкое» травление и идеально подходит для производства изделий с субмикронной структурой.

Также еще одна полезная особенность СВЧ-плазмы – ее способность проникать в узкие полости, что широко используется в производстве МЭМС [7].

Выбор фоторезиста. Под термином фоторезист понимается светочувствительная полимерная пленка, которая под воздействием света меняет свои физико-химические свойства и обладает устойчивостью к химическому или механическому воздействию [8].

Во время травления фоторезист подвергается воздействию следующих факторов: химическим реакциям, физическому распылению, УФ-излучению и температуре.

Все эти факторы действуют одновременно и оказывают влияние на маску из любого фоторезиста в процессе травления. Их влияние тем сильнее, чем длительней процесс плазмохимического травления. Если глубина травления невелика, то время процесса в большинстве случаев будет небольшим, т. е. воздействие плазмы на фоторезист будет минимальным.

В таких случаях для процесса подойдут практически любые фоторезисты на основе нафтохинондиазида. Для этих процессов стоит выбирать особый тип резиста только в том случае, если требуется высокая стабильность маски при нагреве

(отсутствие оплавления). Такая необходимость возникает, если отвод тепла от подложки в реакторе недостаточен [8].

Оборудование. Для выполнения плазмохимического травления в промышленности используются установки, позволяющие выполнять одиночную и групповую обработку пластин. Большинство систем отличаются компактными размерами, укомплектованы вакуумным шлюзом и удобными креплениями для пластин [9]. Наличие программного обеспечения позволяет автоматизировать процесс. Основные технические характеристики установок: характеристики электрода, тип загрузки пластин, тип плазмы, характеристики генератора, тип вакуумной камеры, тип системы откачки и давление воздуха в камере, электропитание и габариты [9].

Литература

1. Плазменные технологии для обработки поверхности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://sernia.ru/training/plazmennye_tekhnologii_dlya_obrabotki_poverkhnosti.
2. Плазменное травление: Снятие оксидных слоев, фоторезиста [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.plasma.com/ru/travlenie-plazmoi>.
3. Плазменное травление (RIE, RIE-ICP, DRIE) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minateh.ru/equipment/technological/plasma-etching>.
4. The Operating Principle of the Microwave Plasma Technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://plasma-dynamics.it/operating-principle-of-the-microwave-plasma-technology/#>.
5. Shibkov, V. M. Microwave Discharges and Their Application I. Surface Microwave Discharge / V. M. Shibkov // Moscow University Physics Bulletin. – 2019. – 74, № 5. – P. 421–437.
6. Deposition: Plasma, the fourth aggregation state of a material [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.halbleiter.org/en/deposition/plasma>.
7. Симонов, О. Использование микроволновой плазмы для удаления фоторезиста при групповой обработке полупроводниковых пластин [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://eurointech.ru/products/PVA/PVA_Electronica_NTB_2_2017.pdf.
8. Фоторезист как пользоваться, как выбрать, как хранить и работать с ним [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://frast.ru/fotoresists.html>.
9. Фоторезисты для плазмохимического травления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ostec-group.ru/group-ostec/pressroom/articles/ekhnologii/fotorezisty-dlya-plazmokhimicheskogo-travleniya>.

УДК 535.37

ЭТАЛОННЫЕ ОБРАЗЦЫ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКОГО ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА

Лабода Н. В.^{1,2}, Тарасов Д. С.^{1,2}, Самцов М. П.¹, Воропай Е. С.²

¹НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ

²Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе выполнен подбор эталонных образцов для контроля работы аппаратуры для измерения длительности затухания флуоресценции. Для наносекундного временного диапазона предложено использовать набор растворов органических красителей в органических растворителях. В него вошли растворы в этаноле красителей оксазин 17, DCM, родамин 6Ж и индотрикарбодцианинового красителя НТС, а также раствор нового индотрикарбодцианинового красителя в о-дихлорбензоле. Показано, что в таких средах растворы представляют собой систему из одного поглощающего и флуоресцирующего центра, высокая стабильность при хранении красителей в виде порошка и достаточная для проведения измерений в соответствующих растворах. Для микросекундного диапазона предложено использовать сапфир с титаном. **Ключевые слова:** длительность затухания флуоресценции, время-коррелированный счет одиночных фотонов, органические красители.

REFERENCE SAMPLES FOR SPECTRAL-KINETIC LUMINESCENT ANALYSIS

Laboda N.^{1,2}, Tarasov D.^{1,2}, Samtsov M.¹, Voropay E.²

¹A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University

²Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The paper is devoted to the selection of reference samples for monitoring the operation of equipment for measuring the fluorescence decay time. For the nanosecond time range, it is proposed to use a set of solutions of organic dyes in organic solvents. It includes solutions of oxazine 17, DCM, rhodamine 6G and indotricarbocyanine dye НТС in ethanol, as well as a solution of a new indotricarbocyanine dye in o-dichlorobenzene. It is shown that in such media, the solutions represent a system of one absorbing and fluorescent center, which is necessary for using them as a standard. High stability during storage of the dyes in powder form and sufficient for measurements in the corresponding solutions are established. For the microsecond range, it is proposed to use sapphire with titanium.

Key words: fluorescence decay time, time-correlated single photon counting, organic dyes.

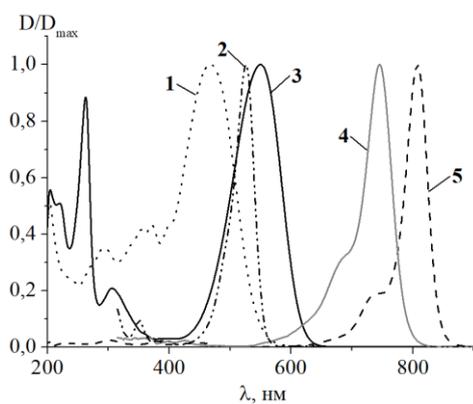
Адрес для переписки: Тарасов Д. С., ул. Курчатова 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: dmitrij-tarasov@list.ru

Длительность затухания флуоресценции одна из ключевых характеристик, которая используется во флуоресцентной спектроскопии, в особенности при исследовании различных биобъектов [1, 2]. Исследование кинетики затухания флуоресценции дает дополнительную информацию, которая обычно не доступна из данных стационарной спектроскопии. Существует ряд методов регистрации кинетики затухания флуоресценции: стробоскопический, фазово-модуляционные и импульсные методы, а также методы с использованием стрик-камеры. Сегодня наибольшее распространение получил метод время-коррелированного счета одиночных фотонов (Time-Correlated Single Photon Counting, TCSPC). Этот метод лежит в основе ряда доступных коммерческих импульсных спектрофлуориметров, а также систем флуоресцентной микроскопии с временным разрешением (Fluorescence Lifetime Imaging Microscopy, FLIM).

Качество регистрируемых по методу TCSPC кинетик затухания флуоресценции зависит от длительности и временного профиля импульсных

источников, времени отклика фотодетектора, характеристик контроллера для анализа времен прилета одиночных фотонов, а также программного обеспечения для анализа кинетики затухания флуоресценции. Для контроля стабильности работы подобного рода аппаратуры, в том числе для сравнения результатов, полученных на приборах разных производителей разумно использовать эталонные образцы с известной длительностью затухания флуоресценции. Актуальность данной проблемы обусловлена тем, что в НИИПФП им. А. Н. Севченко ведутся работы по разработке отечественного лазерного импульсного спектрофлуориметра. В данной работе предложен набор эталонных образцов с длительностью затухания флуоресценции в нано- и микросекундном диапазоне. Основные требования к эталонному образцу – независимость длительность затухания флуоресценции от длины волны возбуждения и регистрации, высокая временная стабильность образцов. Первое условие выполняется для системы состоящей из одного поглощающего и флуоресцирующего центра. В связи с этим подобран набор эталонных растворов флуоресци-

рующих красителей. В него вошли красители оксазин 17, DCM, родамин 6Ж и индотрикарбоцианиновый краситель НТС (ПК1) в этаноле, а также раствор нового индотрикарбоцианинового красителя ПК2 в о-дихлорбензоле. Их полосы поглощения (рисунок 1) в совокупности лежат в диапазоне 270-830 нм, который покрывает нужды для большинства флуоресцирующих молекулярных систем. Исследования спектрально-люминесцентных свойств данных красителей в соответствующих средах показали, что представленные образцы представляют собой систему, состоящую из одного поглощающего и флуоресцирующего центра. Так для всех эталонных образцов наблюдается постоянство спектра поглощения при изменении концентрации красителя. Максимум полосы поглощения оксазина 17 в этаноле располагается вблизи 550 нм, DCM в этаноле – 468 нм, родамина 6Ж в этаноле – 526 нм, ПК1 в этаноле – 745 нм, ПК2 в о-дихлорбензоле – 807 нм.

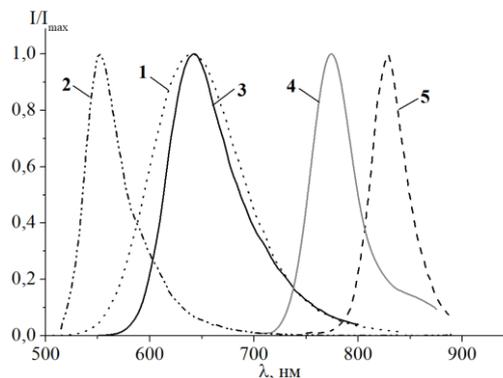


1 – DCM в этаноле; 2 – родамин 6Ж в этаноле;
3 – оксазин 17 в этаноле; 4 – ПК1 в этаноле;
5 – ПК2 в о-дихлорбензоле

Рисунок 1 – Нормированные спектры поглощения растворов красителей

Исследования люминесцентных свойств эталонных образцов проводились с помощью спектрофлуориметра Fluorolog. Концентрация красителей в растворах подбиралась такой, чтобы оптическая плотность в максимуме полосы поглощения не превышала 0,1. Установлено, что форма спектра (рисунок 2), квантовый выход и длительность затухания флуоресценции у всех образцов не зависят от длины волны возбуждения. Максимум флуоресценции наблюдается на следующих длинах волн: оксазин 17 в этаноле – 641 нм; DCM в этаноле – 640 нм; родамин 6Ж в этаноле – 552 нм; ПК1 в этаноле – 773 нм; ПК2 в о-дихлорбензоле – 827 нм. Кинетика затухания флуоресценции наилучшим образом аппроксимируется одной экспонентой. Получены следующие времена затухания флуоресценции при температуре 17 °: оксазин 17 в этаноле – 3,3 нс; DCM в этаноле – 1,5 нс, родамин 6Ж в этаноле – 4,09,

ПК1 в этаноле – 1,2 нс, ПК2 в о-дихлорбензоле – 1,3 нс. Все предложенные красители продемонстрировали достаточную временную стабильность при хранении в виде порошка (месяцы и годы), и стабильность в соответствующих растворах в затемненных условиях не менее 14 суток.



1 – DCM в этаноле; 2 – родамин 6Ж в этаноле;
3 – оксазин 17 в этаноле; 4 – ПК1 в этаноле;
5 – ПК2 в о-дихлорбензоле

Рисунок 2 – Нормированные спектры флуоресценции растворов красителей

Для микросекундного диапазона предложено использовать сапфир с титаном, для которого длительность затухания флуоресценции при регистрации на длине волны 740 нм при возбуждении лазерами с длиной волны излучения 405 нм, 450 нм или 510 нм составила 3,11 мкс (рисунок 3).

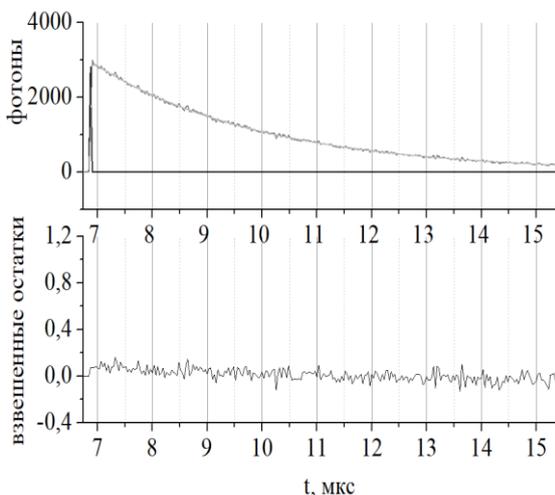


Рисунок 3 – Кинетика затухания флуоресценции сапфира с титаном при возбуждении лазером 510 нм и регистрации на длине волны 740 нм

Литература

1. Jameson, D. M. Fluorescence: Basic concepts, practical aspects, and some anecdotes / D. M. Jameson, J. C. Croney, P. D.J. Moens // *Methods in Enzymology*. – 2003. – V. 360. – P. 1–43.
2. Lakowicz, J.R. Instrumentation for Fluorescence Spectroscopy / J. R. Lakowicz // *Principles of Fluorescence Spectroscopy*. – 3rd ed. – New York, 2006. – Ch. 1. – P. 27–61.

УДК 621.1: 679.8

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОБРАБОТКИ ШАРИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Луговой В. П., Попов Р. А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Предложено устройство для экспериментального исследования процесса шлифования шариков из твердых материалов с использованием ультразвуковых колебаний.

Ключевые слова: шарики, обработка, устройство, ультразвуковые колебания.

DEVICE FOR PROCESSING BALLS USING ULTRASONIC VIBRATIONS

Lugovoi V., Popov R.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A device has been proposed for an experimental study of the process of grinding balls made of hard materials using ultrasonic vibrations.

Key words: balls, processing, device, ultrasonic vibrations,

Адрес для переписки: Луговой В. П., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by

Замена стальных шаров на материалы с улучшенными характеристиками (твердостью, жаростойкостью и износостойкостью), позволяет обеспечить более высокие эксплуатационные показатели шарикоподшипников при высоких скоростях вращения. Их применяют в гибридных шарикоподшипниках, в которых сочетающихся подобные тела качения со стальными кольцами, обладающими высоким качеством отделки поверхности. К числу применяемых для этих целей материалов для изготовления шариков следует отнести композиционные материалы, керамику (карбида бора), ситаллы и пр.

Однако технологический процесс изготовления шаров из особо твердых материалов представляет определенную сложность. Наиболее широко применимым способом обработки шариков из твердых материалов во многих случаях является алмазно-абразивная групповая обработка между вращающимися дисками, осуществляемая в несколько стадий [1]. Недостатком такого технологий обработки керамических шаров между вращающимися дисками является низкая производительность. Процесс абразивной обработки керамического материала при этом сопровождается образованием боковых сколов и вырыванием кластеров из поверхностного слоя, которые влияют на формирование шероховатости поверхностного слоя.

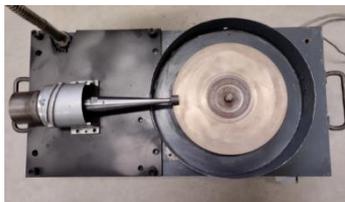
В связи с этим целью настоящей работы является поиск более производительного метода обработки и устройства для его осуществления. К числу современных методов, обеспечивающих интенсификацию процесса абразивной обработки твердых и хрупких материалов следует отнести ультразвуковые технологии, нашедшие широкое применение в машиностроении и приборостроении. Было установлено, что использование

ультраульковых колебаний в процессе абразивной доводки стальных шариков, позволяет получить положительный эффект по производительности и по параметром точности обработанных заготовок. Устройство для реализации этого способа, содержит два диска, между которым обкатываются шарики. В одном из инструментов, присоединенном к излучателю колебаний [2], возбуждаются изгибные колебания. Было установлено, что показатели обработки зависят от относительного положения концентрических канавок одного диска к пучности ультразвуковых колебаний, возбуждаемых в другом.

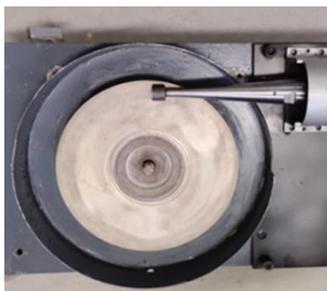
Способ ультразвуковой абразивной обработки открытых сферических поверхностей [3] содержит сферический инструмент (шарик), прижимаемый сверху торцом ультразвукового концентратора. Колебаний концентратора передаются шарик и приводят его в беспорядочное вращение, обеспечивая съем обрабатываемого материала, расположенного под инструментом. Действие ультразвуковых колебаний при этом перпендикулярно поверхности обрабатываемого материала. Вместе с тем представляет интерес характер действия ультразвуковых колебаний при иных вариантах направления ультразвуковых колебаний. Можно полагать, что данная схема абразивной обработки может быть успешно использована также для шлифования самих шариков, которые будут служить в данном случае уже объектом механической обработки.

Кроме того, исследованиями М. Г. Киселева [4] было установлено, что на процесс трения скольжения, в том числе и абразивного, существенное влияние оказывает направление ультразвуковых колебаний. При этом были рассмотрены три варианта схем направления действия ультразвуковых колебаний: перпендикулярно или каса-

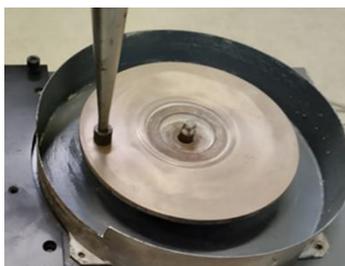
тельно к поверхности трения скольжения, которые показали, что каждая из схем имеет отличительные кинематические и динамические условия взаимодействия контактируемых поверхностей.



а



б



в

а – радиальное; б – касательное;
в – перпендикулярное

Рисунок 1 – Варианты направления ультразвуковых колебаний по отношению к шлифовальному диску

Анализ перечисленных методов обработки показывает, что при шлифовании шариков в трех вариантах направления действия ультразвуковых колебаний по отношению к шлифовальному диску, кинематические и динамические условия взаимодействия контактируемых поверхностей также будут различными. С целью экспериментального подтверждения этого положения, была разработана экспериментальная установка для проведения сравнительных испытаний (рисунок 1). Экспериментальная установка состоит из станке модели СУН 3435 для огранки камней и ультразвукового преобразователя с коническим концентратором колебаний. На рабочем торце концентратора закреплен сменный инструмент с конически углублением для размещения в нем обрабатываемого шарика. Обрабатываемый шарик при шлифовании размещается между сменным наконечником ультразвукового концентратора и вращающимся дисковым инструментом. Шлифовальный диск получает вращение от двигателя постоянного тока через клиноремennую передачу. Станок позволяет регулировать скорость вращения шлифовального круга до 2000 об/мин.

Литература

1. Алмазная доводка керамических шаров из карбида бора / Сохань С. В. [и др.] // Киев, Оборудование и инструмент, Металлообработка. – 2018. – № 3. – С. 57.
2. Луговой, В. П. Исследование процесса доводки шариков в поле ультразвуковых колебаний: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Минск, 1980. – 18, с.
3. А.С. СССР 191328. Устройство для обработки открытых сферических поверхностей / А. Л. Горбунов, Е. П. Коменоп, В. М. Салтанов. – Оpubл. 9.02.1967.
4. Киселев, М. Г. Исследование некоторых параметров процесса трения скольжения в ультразвуковом поле: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Минск, 1973. – 23 с.

УДК 613.648.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ НА ОСНОВЕ СПЛАВА 29НК
Назарчук К. А.¹, Горанов И. В.¹, Люцко К. С.¹, Ластовский С. Б.²

¹Белорусский национальный технический университет

²ГО «Научно-практический центр НАН Беларуси
 по материаловедению»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Испытаны защитные экраны на основе сплава НК29 и алюмооксидной керамики от воздействия на изделия микроэлектроники потоков электронов с энергией 1,6–2,4 МэВ. Показано, что экраны на основе ковара толщинами 0,75, 1,0 и 1,5 мм ослабляют поглощенную дозу в 11, 24 и 133 раза, соответственно.

Ключевые слова: защитный экран, поглощенная доза, электрон, сплав НК29.

DETERMINING THE EFFICIENCY OF PROTECTIVE SCREENS BASED ON 29NK ALLOY
Nasarchuk K.¹, Goranov I.¹, Lyutsko K.¹, Lastovskii S.²

¹Belarusian National Technical University

²SO«SPC NAS of Belarus for Materials Science»
 Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Protective screens based on NK29 alloy and aluminum oxide ceramics were tested against the impact of electron flows with an energy of 1.6–2.4 MeV on microelectronic products. It was shown that screens based on kovar with thicknesses of 0.75, 1.0 and 1.5 mm weaken the absorbed dose by 11, 24 and 133 times, respectively.

Key words: protective screen, absorbed dose, electron, alloy NK29.

Цель работы. Целью данной работы являлось определение эффективности защитных экранов на основе сплава ковара 29НК.

Методика исследования. Облучение исследуемых образцов проводилось на линейном ускорителе электронов ЭЛУ-4 с номинальной энергией равной 4 МэВ. Флюенс был равен $(0,5 : 4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, а плотность потока электронов, контроль которой проводился при помощи цилиндра Фарадея, составляла $3,3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

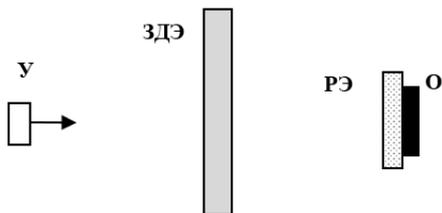
В связи с потенциальным дальнейшим применением данных экранов в космической промышленности исследования следует проводить с оглядкой на спектр электронов РПЗ. Из-за того, что коэффициент ослабления существенно зависит от энергетических спектров излучений потребовалось понизить энергию электронов и приблизить ее к спектрам РПЗ [1]. Для этого между окном вывода ускорителя и образцом помещалась дюралюминиевая пластина толщиной 5 мм. Схема эксперимента приведена на рисунке 1.

Пучок заряженных частиц (электронов) с энергией 4 МэВ выходит из окна вывода ускорителя, после чего попадает на дюралюминиевую пластину, которая выполняет роль замедляющего экрана. Данный экран замедляет поток частиц, понижая их энергию до требуемых 1,6–2,4 МэВ. Далее частицы продолжают свой путь до исследуемого экрана за которым находится тестовой образец. Дюралюминиевый экран устанавливался на расстоянии 0,5 м, а исследуемый экран с образцом на расстоянии 1 м. По следующему за облучением изменению вольтамперных характеристик (ВАХ) образца, а именно изменению падения напряжения (ΔU) при $I_c = 10^{-7} \text{ А}$ определялась поглощенная образцом доза излучения. Для каждой дозы облучения использовалась отдельная микросхема. Для оценки эффективности экранирования использовались два тестовых образца. Один из них был закрыт тестируемым экраном, второй облучался без защиты. По первому образцу находилась поглощенная доза, прошедшая защитный экран, а по второму дозы падающего на защитный экран излучения.

Согласно методике исследования требовалось знать параметры тестовых микросхем до и после облучения. Для этого использовался измеритель параметров полупроводниковых приборов ИППП-1/6. Коэффициент экранирования K_s для каждого экрана определяли из соотношения:

$$K_s = D_n / D_{n0}, \quad (1)$$

где D_n – доза параметрического отказа тестовой структуры за защитным экраном; D_{n0} – доза параметрического отказа тестовой структуры без экрана.



У – окно вывода электронов ускорителя;
 ЗДЭ – замедляющий дюралюминиевый экран;
 РЭ – радиационный экран; О – тестовый образец

Рисунок 1 – Схема испытаний радиационных экранов

В данном исследовании к параметрическому отказу приравнялось отклонение порогового напряжения на 0,1 В.

Тестовые образцы. В качестве тестовых образцов выступали КМОП ИМС серии IN74ACXXXN, прототипом которых является микросхема MC74ACXXXN (фирма «ON Semiconductor», США). Микросхемы данной серии предназначены для использования в высокопроизводительных системах обработки информации широкого применения. Данные схемы позволяют создавать вычислительные устройства и устройства цифровой автоматики с качественно новыми характеристиками и высокими технико-экономическими показателями благодаря их высокому быстродействию и низкой потребляемой мощности. Микросхемы данной серии изготавливаются по технологии с окисной изоляцией, двухуровневой металлизацией, поликремниевым затвором шириной 1,4 мкм. Конструктивно микросхемы оформлены в пластмассовые корпуса типа DIP с количеством выводов от 14 до 24 и стандартным расположением выводов «питание», «земля» [2].

Технические характеристики образцов. Стандартные КМОП входные и выходные уровни сигналов. Диапазон напряжений питания 2–6 В. Задержка на вентиль 3,5 нс. Тактовая частота до 150 МГц. Большой выходной ток нагрузки низкого и высокого уровней 24 мА. Гарантированные характеристики в диапазоне температур от -45°C до $+85^{\circ}\text{C}$ и напряжений питания от $5\text{ В} \pm 10\%$ до $3,3 \pm 0,3\text{ В}$. Высокая устойчивость к статическому электричеству и защелкиванию. Допустимое значение потенциала статического электричества 1500 В. Возможность работы на нагрузку 50 Ом [2].

Результаты испытаний. В ходе данного испытания оценивалась эффективность защиты крышек корпусов на основе ковара. Ковар – это никель–железо–кобальтовый сплав, известный своим низким коэффициентом теплового расширения. Обычно он состоит из 29 % никеля, 17 % кобальта и 54 % железа с примесями кремния, углерода, марганца.

Результаты исследования пластин экранов показаны на рисунке 2. Все пластины имели толщину 0,25 мм, поэтому для увеличения толщины складывались несколько пластин.

Как можно увидеть на рисунке 2 зависимость изменения напряжения от флюенса электронного облучения имеет обычный вид, а именно происходит монотонный рост ΔU во всем диапазоне флюенсов. Ожидаемо, с ростом толщины экрана из ковара зависимость постепенно ослабевает. Последующий анализ результатов исследования показывает, что требуемый уровень защиты достигается при толщинах экрана выше 1,5 мм.

Наконец мы можем оценить коэффициент экранирования K_3 для каждого из экранов из соотношения (1). Так мы получаем, что экраны толщиной 0,75; 1,0 и 1,5 мм обладают эффективностью защиты от электронов $K_3 = 11$; 24 и 133, соответственно.

Таким образом, проведены испытания радиационно-защитных экранов на основе сплава НК29 для изделий микроэлектроники от потоков электронов с энергией 1,6–2,4 МэВ. Показано, при толщинах экранов 0,75, 1,0 и 1,5 мм коэффициент эффективности экранирования составляет $K_3 = 11$; 24 и 133, соответственно.

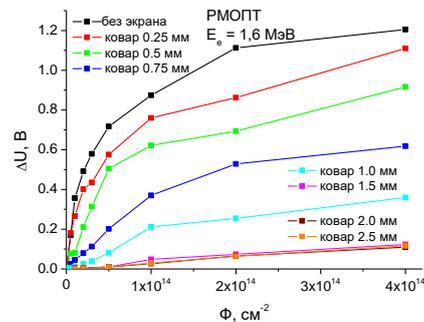


Рисунок 2 – Изменения напряжения ΔU для p -МОПТ при облучении электронами микросхем за радиационными экранами на основе сплава 29НК

Литература

1. Зинченко, В. Ф. Влияние материального состава защиты на прогнозируемые дозовые нагрузки в критических элементах космических аппаратов / В. Ф. Зинченко, В. М. Ужegov // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2013, № 1. – С. 18–23.
2. Логические ИС КР1533, КР1554 / И. И. Петровский [и др]. – Бино, 1998. – Т. 1. – 756 с.

УДК 621.382

СТОКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛОВЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ С ДИЭЛЕКТРИКОМ, АЗОТИРОВАННЫМ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ

Оджаев В. Б.¹, Пеглицкий А. Н.², Просолович В. С.¹, Ковальчук Н. С.², Черный В. В.³, Шестовский Д. В.², Янковский Ю. Н.¹

¹Белорусский государственный университет

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

³Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследовано влияние азотирования подзатворного оксида методом ионной имплантации на вольт-амперные характеристики силовых МОП-транзисторов. Установлено, что в диапазоне напряжений на затворе $V_G = 0,5 \dots 1,5$ В происходит снижение тока сток-исток p -канальных МОП-транзисторов по сравнению с контрольными образцами. Указанный эффект наиболее ярко выражен для прямого порядка быстрой термообработки, что, вероятно, связано с увеличением концентрации легирующей примеси в канале МОП-транзистора вследствие изменения коэффициента сегрегации фосфора границей раздела SiO_2/Si , обогащенной атомами азота. Для обратного порядка термообработки уменьшение величины тока сток-исток в подпороговой области вольт-амперной характеристики менее ярко выражено по сравнению с прямым порядком.

Ключевые слова: силовые МОП-транзисторы, ионная имплантация, ток сток-исток, коэффициент сегрегации.

DRAIN CHARACTERISTICS OF POWER MOSFETs WITH DIELECTRIC NITRIDED BY ION IMPLANTATION

Odzhaev V.¹, Pyatlitski A.², Prosolovich V.¹, Kovalchuk N.², Chornyi V.³, Shestovsky D.², Yankovski Yu.¹

¹Belarusian State University

²“INTEGRAL” Joint Stock Company

³Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The effect of nitriding of the sub-gate oxide by ion implantation on the volt-ampere characteristics of power MOSFETs has been studied. It is found that in the range of gate voltage $V_G = 0.5 \dots 1.5$ V the drain-source current of p -channel MOSFETs decreases in comparison with control samples. This effect is most pronounced for the direct order of rapid heat treatment, which is probably associated with an increase in the dopant concentration in the MOSFET channel due to changes in the phosphorus segregation coefficient by the SiO_2/Si interface enriched with nitrogen atoms. For the reverse order of heat treatment, the decrease in the value of the drain-source current in the subthreshold region of the volt-ampere characteristic is less pronounced compared to the direct order.

Keywords: power MOSFETs, ion implantation, drain-source current, segregation factor

Адрес для переписки: Просолович В. С., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: prosolovich@bsu.by

Ранее было установлено, что для ряда силовых МОП-транзисторов с вертикальной структурой, созданных с применением дополнительной операции имплантации ионов (ИИ) азота наблюдается увеличение величины заряда пробоя подзатворного диэлектрика, а также уменьшение плотности фиксированного заряда [1]. Показано также, что для таких приборов наблюдается снижение как величины и шумов тока утечки затвора [1]. Это обусловлено снижением плотности поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO_2 в МОП-структурах, созданных с применением дополнительной операции ионной имплантации азота при прямом порядке термообработки.

В работе исследовалось влияние азотирования подзатворного оксида методом ионной имплантации на вольт-амперные (ВАХ) характеристики силовых МОП-транзисторов.

Азот имплантировался в активную область p -канальных МОП-транзисторы через защитный оксид толщиной 23 нм энергиями 20 и 40 кэВ в

диапазоне доз $1 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{14}$ см⁻² в одну половину кремниевой пластины. Затем образцы подвергались быстрому термическому отжигу (БТО) при температуре 1000 °С длительностью 15 с и химическому травлению защитного оксида. Для одной группы пластин проводилось сначала БТО с последующим снятием оксида (прямой порядок), а для другой группы – сначала снятие оксида, а потом пластины подвергались БТО (обратный порядок). Затем проводилось выращивание оксида затвора толщиной 42 нм и последующие операции по формированию прибора. Параллельно исследовались контрольные образцы, прошедшие все этапы формирования прибора, но без ионной имплантации азота (W/O). Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводились на измерителе параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A с зондовой станцией Cascade Summit 11000B-AP.

Исследования сток-источковых ВАХ от напряжения на затворе (V_G) МОП-транзисторов в

триодном режиме (рисунок 1) показали, что в подпороговой области ($V_G = 0,5 \dots -1,5$ В) ВАХ является линейной в логарифмическом масштабе. Наблюдается ее смещение вправо вдоль оси напряжений для образцов, дополнительно имплантированных ионами азота, что свидетельствует о меньших значениях тока сток-исток (I_{DS}). Величина подпорогового диффузионного тока сток-исток при слабой инверсии для МОП-транзистора определяется геометрическими размерами канала, емкостью подзатворного диэлектрика, подвижностью носителей в канале, напряжением сток-исток и концентрацией примеси в канале ($I_{DS} \sim N_D$) [3]. Геометрические размеры и емкости подзатворного оксида как для контрольных, так и для образцов с азотированным подзатворным оксидом кремния различались незначительно (~1 %). Наиболее вероятным процессом, оказывающим влияние на снижение I_{DS} в подпороговой области ВАХ, является увеличение концентрации легирующей примесей фосфора в канале МОП-транзистора вследствие изменения его коэффициента сегрегации.

На рисунке 1 представлены зависимости относительного изменения тока сток-исток ($\Delta I_{DS}/I_{DS}$) от напряжения на затворе p -канальных МОП-транзисторов. Видно, что при изменении напряжения на затворе в подпороговой области ВАХ $V_G = 0,5 \dots -1,5$ В наблюдается спад относительного изменения величины I_{DS} . В области $V_G = -1,5 \dots -2,5$ В данные различия уменьшаются. Данный эффект наиболее ярко выражен для прямого порядка БТО. При проведении БТО при наличии защитного оксида кремния и в ходе выраживания подзатворного диэлектрика, содержащего на границе раздела SiO_2/Si атомы азота, происходит снижение коэффициента сегрегации фосфора, и как следствие, увеличение концентрации легирующей примеси в канале МОП-транзистора. Это обуславливает снижение диффузионного тока в подпороговой области ВАХ. Наибольшее снижение I_{DS} при $V_G = -1$ В наблюдаются для образцов, имплантированных дозой $N^+ 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ при прямом порядке БТО.

Для образцов с обратным порядком термообработки с ИИ азота $D_{N^+} = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ эффект снижения величины I_{DS} выражен не так ярко по сравнению с образцами, полученными с применением прямого порядка. Это связано с аннигиляцией части постимплантационных дефектов на

поверхности кремния при проведении БТО без защитного SiO_2 и, как результат, – снижение концентрации дефектов в Si.

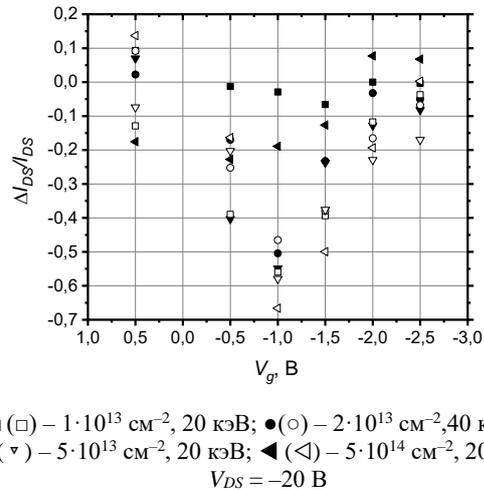


Рисунок 1 – Зависимости относительного изменения тока сток-исток ($\Delta I_{DS}/I_{DS}$) от напряжения на затворе МОП-транзисторов с диэлектриком азотированным методом ИИ, по сравнению с соответствующими контрольными образцами. Режимы имплантации азота (черные значки – обратный порядок БТО, белые значки – прямой порядок БТО)

Установлено, что в диапазоне напряжений на затворе $V_G = 0,5 \dots -1,5$ В происходит снижение I_{DS} p -канальных МОП-транзисторов по сравнению с контрольными образцами, обусловленное увеличением концентрации легирующей примеси в канале МОП-транзистора. Наличие на границе раздела SiO_2/Si атомов азота при проведении БТО, блокирует сегрегацию фосфора в оксид.

Литература

1. Влияние ионной имплантации азота на электрофизические свойства подзатворного диэлектрика силовых МОП-транзисторов / В. Б. Оджаев [и др.] // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2020. – № 3. – С. 55–64.
2. Электрофизические характеристики силовых МОП-транзисторов, дополнительно имплантированных ионами азота. / В. Б. Оджаев [и др.] // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2022. – № 3. – С. 81–92.
3. Sze, S. M. Semiconductor Devices: Physics and Technology / S. M. Sze, M. -K. Lee. – 3rd ed. – Hoboken, N. J: Wiley, 2012. – 592 p.

УДК 52621. 373.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАТЕЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИМПУЛЬСА В ПРОГРАММЕ LTspice

Петухов И. Б.

*ОАО «Планар-СО»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Проведено моделирование работы формирователя высоковольтного импульса для пробоя воздушного разрядного промежутка между электродом разрядника и концом золотой или медной проволоки при формировании шарика в технологии микросварки проволочных выводов.

Ключевые слова: высоковольтный импульс, формирование шарика, разрядник, проволочный монтаж, напряжение пробоя воздушного зазора.

SIMULATION OF A HIGH-VOLTAGE PULSE FORMING IN THE LTspice SOFTWARE

Petuhov I. B.

*OJSC «Planar-SO»
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. High-voltage pulse forming for the breakdown of the air discharge gap between the spark gap electrode and the end of a gold or copper wire during the formation of a ball in the wire bonding technology of wire leads was simulated.

Key words: high voltage pulse, wire ball formation, spark electrode, wire bonding, air gap breakdown voltage.

*Адрес для переписки: Петухов И. Б., пр. Партизанский, 2/6, г. Минск, 220033, Республика Беларусь
e-mail: petuchov@kbtm.by*

В технологии монтажа проволочных межсоединений методом «шарик-клин» используется проволока диаметром от 17,5 до 50 мкм из таких материалов, как золото, медь и серебро. Первая точка соединения выполняется предварительно сформированным шариком встык капилляром с вертикальной подачей проволоки, а вторая точка-клиновым соединением с образованием конца проволоки под рабочим торцем инструмента для последующего оплавления электрическим разрядом между электродом разрядника и проволокой.

В настоящее время существует технология формирования на контактных площадках подложки или кристалла объемных выводов на основе присоединения шарика и обрыва проволоки над ним, для возможности выполнения присоединения кристаллов по технологии flip-chip. Очевидно, что для данной технологии важно формировать шарики на конце проволоки стабильного диаметра. При формировании шарика используется метод подачи высоковольтного напряжения отрицательной полярности на разрядник [1], при этом разрядник конструктивно находится на расстоянии от конца проволоки 0,7–1,2 мм. Экспериментально установлено, что для инициализации пробоя воздушного промежутка длиной 1 мм при нормальных условиях составляет порядка 3 кВ, соответственно для зазора в 2 мм необходимое напряжение пробоя становится порядка 6 кВ. Существуют много топологий получения высоковольтных источников питания, однако для оплавления проволоки из золота, меди и серебра диаметром 17,5–50 мкм есть свои особенности. Во первых, инициализация пробоя воздушного про-

межутка должна осуществляться коротким импульсом длительностью 1,2–1,5 мс и током не более 3–5 мА, дальнейшее оплавление проволоки осуществляется разрядом при пониженном напряжении 700–800 В со стабилизацией тока разряда и заданной длительности в диапазоне 1,5–7 мс с током разряда в диапазоне 5–50 мА в зависимости от диаметра проволоки. Например, для золотой проволоки диаметром 30 мкм стандартный ток разряда составляет 25–27 мА длительностью 1,8–2,1 мс. В данной работе проведено моделирование формирования высоковольтного пробойного импульса на симуляторе LTspice свободно распространяемой компанией Analog Devices [2]. Поскольку преобразователи низкого напряжения в высокое обычно содержат трансформатор, логично предварительно промоделировать формирование выходного напряжения и поведение управляющей схемы. В различных публикациях, например [3] утверждается, что в LTspice хорошо моделируются схемы импульсных преобразователей. Для моделирования выбрана двухтактная схема преобразователя на ферритовом сердечнике RM14, показанная на рисунке 1. Источник питания преобразователя (может быть регулируемый для установки амплитуды пробойного напряжения) с максимальным напряжением 40 В. Управляющие импульсы с микросхемы DD1 TL494 поступают в затворы полевых транзисторов на частоте 50 кГц, которые попеременно переключают первичные обмотки. В LTspice коэффициент трансформации определяется как корень квадратный отношения индуктивности вторичной обмотки к первичной. Таким

образом, при индуктивности вторичной обмотки 5Н и первичной 600 μ Н коэффициент трансформации составляет ~ 90 . Включая на выходе трансформатора утроитель напряжения можно получить амплитуду выходного импульса до 6 кВ.

После запуска симулятора и указывая маркерами точки контроля напряжения можно исследовать форму напряжения в указанных точках схемы. На рисунке 2 показана форма выходного напряжения преобразователя на рисунке 1.

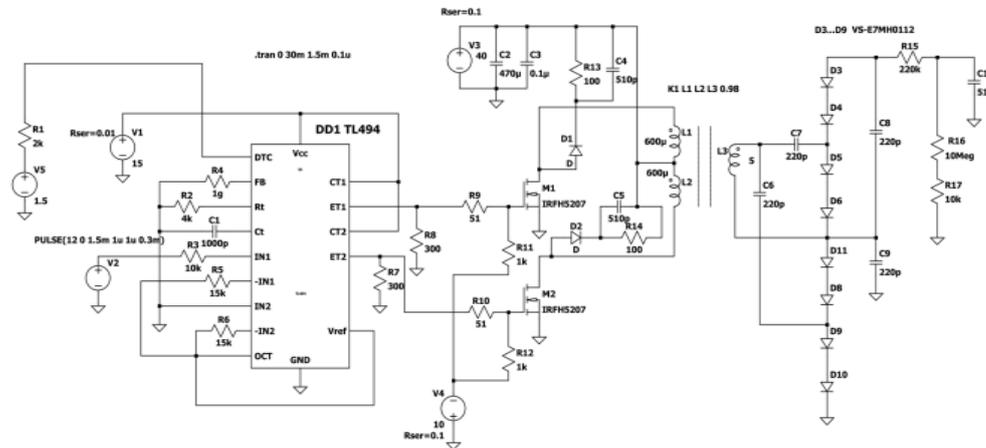


Рисунок 1 – Двухтактный преобразователь

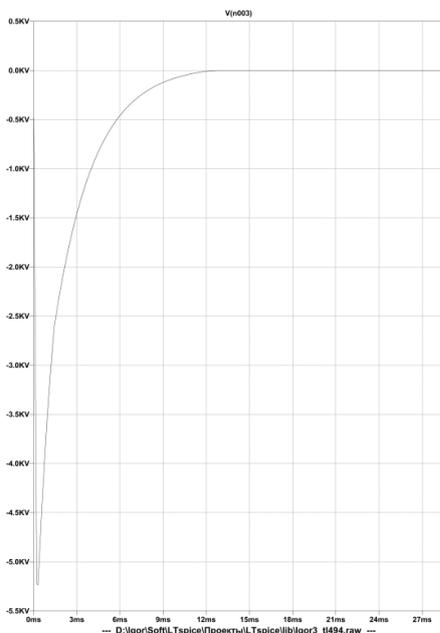


Рисунок 2 – Выходное напряжение преобразователя

Как видно из рисунка 2 выходное напряжение формирователя высоковольтного импульса достигает напряжения 5,2 кВ, что вполне достаточно для пробоя воздушного зазора длиной

1,5 мм. При пробое зазора, воздушный канал становится проводящим за счет движения электронов и положительных ионов. Необходимую величину разрядного тока после пробоя для оплавления проволоки теперь обеспечивает источник напряжения величиной 900–1100 В, который может быть построен на основе аналогичной двухтактной схемы, рассмотренной выше. Результаты моделирования показали их соответствие на изготовленном опытном образце. Преимущество данного решения заключается в возможности регулирования длительности пробойного напряжения, что повышает надежность искрообразования в процессе формирования шарика на конце проволоки.

Литература

1. Петухов, И. Б. Технология и оборудование микросварки в производстве изделий электронной техники / И. Б. Петухов, В. Л. Ланин, В.А. Емельянов. – Минск: Интегралполиграф, 2021. – 186 с.
2. LTspice [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.analog.com.
3. Володин, В. Я. LTspice: компьютерное моделирование электронных схем / В. Я. Володин // СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 400 с.

УДК 666.7

**ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКОГО
ВОЛЛАСТОНИТА ДЛЯ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Попов Р. Ю.¹, Самсонова А. С.¹, Пантелеенко Ф. И.², Каврус И. В.¹, Камлюк Т. В.¹

¹Белорусский государственный технологический университет

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Предложен керамический материал, а также технология его получения, на основе синтетического волластонита для футеровки агрегатов и литейной оснастки для металлургии алюминиевых сплавов. В работе исследовались показатели спекания (плотность, пористость, водопоглощение) образцов, температурный коэффициент линейного расширения, а также механическая прочность при сжатии материала. Изучены физико-химические свойства керамических изделий, установлены зависимости изменения физико-химических характеристик синтезированных материалов от содержания компонентов и температурных режимов обжига. Проведены лабораторные испытания по влиянию расплава алюминия на свойства и структуру волластонитсодержащей керамики на основе импортных и отечественных глин.

Ключевые слова: синтетический волластонит, керамика, синтез, цветная металлургия, алюминиевая промышленность.

**THERMAL INSULATION MATERIALS BASED ON SYNTHETIC WOLLASTONITE
FOR THE ALUMINUM INDUSTRY**

Popov R.¹, Samsonova A.¹, Panteleenko F.², Kavrus I.¹, Kamlyuk T.¹

¹Belarusian State Technological University

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A ceramic material based on synthetic wollastonite is proposed for the lining of aggregates and casting equipment for the metallurgy of aluminum alloys. The sintering parameters (density, porosity, water absorption) of the samples, the temperature coefficient of linear expansion, as well as the mechanical compressive strength of the material were studied. The physicochemical properties of ceramic products have been studied, and the dependences of changes in the physicochemical characteristics of synthesized materials on the content of components and temperature regimes of firing have been established. Laboratory tests were carried out on the effect of aluminum melt on the properties and structure of wollastonite-containing ceramics based on imported and domestic clays.

Key words: synthetic wollastonite, ceramics, synthesis, non-ferrous metallurgy, aluminum industry.

Адрес для переписки: Самсонова А. С., ул. Свердлова, 13А, г. Минск 220006, Республика Беларусь
e-mail: misakamadara@yandex.by

Литейное производство – многосегментная отрасль, использующая десятки литейных технологий, методов формообразования, формовочных материалов, сплавов и оборудования, отрасль, требующая глубоких познаний во многих смежных науках и отраслях, развивающаяся неравномерно по ряду причин [1].

Процесс литья заключается в заливке расплавленного металла в литейную форму, внутренняя полость которой соответствует конфигурации и размерам будущей детали. К специальным видам литья относят литье в кокиль, преимущество которого заключается в получении точных отливок с поверхностью хорошего качества. Расплавленный алюминий поступает в кокиль посредством системы литников [2]. Для удержания тепла и более длительного сохранения расплава в жидком состоянии в прибыльной части отливки литниковой системы предлагается использование тепло-

изоляционных материалов с низким коэффициентом теплопроводности для изолирования расплава от контакта с формой [3, 4].

Целью данной работы является исследование влияния кремнеземсодержащего сырья и пластифицирующих добавок Республики Беларусь на свойства волластонитсодержащей керамики.

Для синтеза волластонитсодержащей керамики использовалась оксидная система CaO–SiO₂. Пределы содержания компонентов в опытных массах и соотношение оксидов CaO/SiO₂ были выбраны на основе проведенного анализа патентно-информационных данных. Согласно анализу, теоретическое соотношение должно находиться в следующих пределах CaO/SiO₂ = 48/52.

В качестве сырьевых материалов были использованы: кальцийсодержащие компоненты – доломитовая мука, мел; кремнийсодержащие компоненты – трепел, маршалит, кремнегель, SiO₂ (чда), кварц молотый (производство ООО «Илмакс»); в качестве пластификаторов – глины Веселовского

месторождения, месторождения Крупейский сад, глина Боровичская.

Изготовление опытных образцов осуществлялось в виде цилиндров диаметром 12 мм методом полусухого прессования при давлении 20–25 МПа. Обжиг материалов проводился в интервале температур 1000–1150 °С с выдержкой при максимальной температуре 1 ч.

Исследования проводились по двум направлениям: на основе различных кремнеземсодержащих компонентов и с применением пластифицирующих добавок.

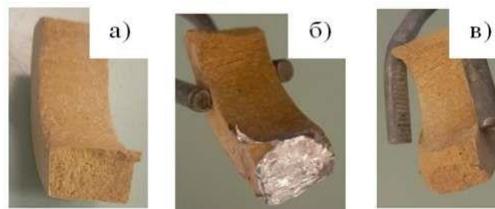
В ходе исследования были получены зависимости физико-химических свойств от температуры обжига. Проанализировав полученные сведения, выбрана оптимальная температура обжига (1150 °С), при которой осуществляется более полное спекание и образцы обладают лучшими эксплуатационными характеристиками.

Из первой серии опытов оптимальный состав представлен следующими компонентами: мел, трепел, глина Веселовского месторождения вводилась в количестве 10,0–20,0. Образец керамики, синтезированный на основе указанного состава характеризовался следующим комплексом свойств: открытая пористость – 47,4 %, водопоглощение – 33,0 %, кажущаяся плотность – 1452 кг/м³, ТКЛР – $6,19 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ в интервале температур (50–300) °С, механическая прочность при сжатии – 9,5 МПа. По результатам рентгенофазового анализа установлено, что основной фазой являются волластонит, кварц, а в небольших количествах – алюмосиликат кальция и магния.

На основании анализа полученных и обработанных результатов из второй серии эксперимента был установлен оптимальный состав с применением различных пластифицирующих добавок, наиболее удовлетворяющий поставленным задачам: мел, трепел «Стальное», глина «Крупейский сад» – в количестве 10,0–20,0. Образец керамики, синтезированный на основе указанного состава, характеризовался следующим комплексом свойств: открытая пористость – 37,9 %, водопоглощение – 21,9 %, кажущаяся плотность – 1740 кг/м³, ТКЛР – $5,86 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ в интервале температур (50–300) °С, механическая прочность при сжатии 13,6 МПа. Рентгенофазовый анализ показал, что основными кристаллическими фазами синтезированных образцов являются волластонит, кварц, а также в небольших количествах – алюмосиликат кальция и магния.

В лабораторных условиях были проведены испытания по влиянию расплава алюминия на структуру и свойства керамических образцов. Для испытаний был выбран алюминий марки АД31 (сплав металлов тройной системы Mg–Al–

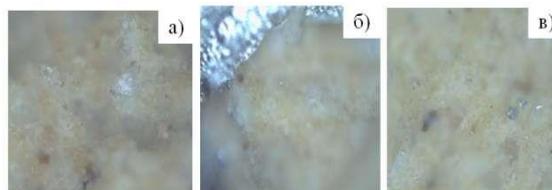
Si), относящийся к группе деформируемых авиалай. Изделия подвергались влиянию расплава (700 °С) более 20 циклов (рисунок 1).



а – до испытания; б – подвергнутые влиянию расплава алюминия; в – после испытания

Рисунок 1 – Образцы, на основе глины «Крупейский сад»

Детальный осмотр материала, а также микроскопическое исследование после испытаний, не выявило существенных изменений в структуре образцов (рисунок 2).



а – до испытания; б – подвергнутые влиянию расплава алюминия; в – после испытания

Рисунок 2 – Структура образца на основе глины «Крупейский сад»

Таким образом, на основании информации изложенной выше можно сделать вывод о том, что наиболее перспективными керамическими огнеупорными материалами для литья алюминия и его сплавов являются огнеприпасы на основе синтезированного волластонита.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (проект № 2023056).

Литература

1. Точное литье в керамическую форму – высокоэффективный способ изготовления отливок сложной формы / Б. И. Уваров [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2016. – № 4 (85). – С. 23–27.
2. Павлюкова, Н. А. Специальные виды литья: учебное пособие // Н. А. Павлюкова, А. С. Орлов. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский гос. энергетический ун-т им. В.И. Ленина», 2012. – 96 с.
3. Патент РФ 2017575. Состав экзотеплоизоляционной смеси для обогрева прибалей / В. Н. Смирнов, И. И. Ярополов. – Опубл. 12.07.1990.
4. Патент РБ 1577. Утеплительная вставка для алюминиевых сплавов / ГНУ «Физико-технический ин-т НАН Беларуси». – Опубл. 30.09.2004.

УДК 539.51

**ВЛИЯНИЕ ФТОРИРОВАНИЯ НА СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА
Er-СОДЕРЖАЩИХ ИТТРИЙ-АЛЮМОБОРАТНЫХ СТЕКОЛ**

Прусова И. В.¹, Прихач Н. К.¹, Ковгар В. В.^{2,3}, Зиятдинова М. С.⁴

¹Белорусский национальный технический университет

²Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси

³Белорусский государственный университет

Минск, Республика Беларусь

⁴Российский химико-технологический институт им. Д. И. Менделеева,

Москва, Российская Федерация

Аннотация. Синтезированы и исследованы иттрий-алюмоборатные стекла, легированные эрбием, в которые дополнительно вводился фтор путем частичного замещения в шихте оксида эрбия на фторид. Установлено, что такое фторирование не приводит к структурным изменениям стекла, но повышает интенсивность излучения ионов Er^{3+} в полосе ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$.

Ключевые слова: иттрий-алюмоборатные стекла, ионы эрбия, люминесценция, фторирование

**INFLUENCE OF FLUORINATION ON THE SPECTRAL-LUMINESCENCE PROPERTIES OF
Er-CONTAINING YTTRIUM-ALUMOBORATE GLASSES**

Prusova I.¹, Prikhach N.¹, Kouhar V.^{2,3}, Ziyatdinov M.⁴

¹Belarusian National Technical University

²B. I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus

³Belarusian State University

Minsk, Republic of Belarus

⁴D. I. Mendeleev University of Chemical Technology

Moscow, Russian Federation

Abstract. Yttrium-alumoborate glasses doped with erbium, in which fluorine was additionally introduced by partial substitution of erbium oxide for fluoride in the charge, have been synthesized and studied. It was found that such fluorination does not lead to structural changes in the glass, but increases the emission intensity of Er^{3+} ions in the band ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$.

Key words: yttrium-aluminoborate glasses, erbium ions, luminescence, fluorination

Адрес для переписки: Прусова И. В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь

e-mail: bntu@bntu.by

Оптические материалы, легированные эрбием, широко используются в качестве активных сред лазеров, функционирующих в условно безопасном для глаз диапазоне при 1,5 мкм. Кроме того, ионы Er^{3+} имеют сложную схему энергетических уровней, в которой значения некоторых энергетических щелей практически совпадают, что перспективно для реализации сложных схем передачи возбуждения. Благодаря этим особенностям ионов Er^{3+} , материалы, легированные эрбием, перспективны для получения генерации во многих каналах [1–3].

Целью данной работы являлось исследование влияния фторирования на спектрально-люминесцентные свойства Er-содержащих иттрий-алюмоборатных стекол.

Исследуемые образцы были синтезированы методом плавления. Плавку осуществляли в платиновых тиглях в электрических лабораторных печах сопротивления с SiC нагревателями на воздухе в течение часа при температуре $T_{\text{снт}} = 1480$ °С. Фтор вводился в стекло путем частичного замещения в шихте оксида эрбия на фторид, дополнительные работы по обезвоживанию

помимо фторирования из-за относительно малых объемов варок не проводились.

На рисунке 1 приведены спектры поглощения оксидных и оксифторидных синтезированных образцов, которые представлены серией полос, характерных для ионов Er^{3+} :

$${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^2G_{9/2} \text{ с } \lambda_{\text{макс}} \approx 363 \text{ нм,}$$

$${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^2K_{15/2} \text{ с } \lambda_{\text{макс}} \approx 378 \text{ нм,}$$

$${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^2H_{9/2} \text{ с } \lambda_{\text{макс}} \approx 407 \text{ нм,}$$

$${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4F_{3/2} \text{ с } \lambda_{\text{макс}} \approx 452 \text{ нм,}$$

$${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4F_{7/2} \text{ с } \lambda_{\text{макс}} \approx 487 \text{ нм,}$$

$${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^2H_{11/2} \text{ с } \lambda_{\text{макс}} \approx 524 \text{ нм,}$$

$${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4S_{3/2} \text{ с } \lambda_{\text{макс}} \approx 542 \text{ нм,}$$

$${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4F_{9/2} \text{ с } \lambda_{\text{макс}} \approx 651 \text{ нм,}$$

$${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{9/2} \text{ с } \lambda_{\text{макс}} \approx 793 \text{ нм,}$$

$${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{11/2} \text{ с } \lambda_{\text{макс}} \approx 973 \text{ нм,}$$

$${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2} \text{ с } \lambda_{\text{макс}} \approx 1527 \text{ нм.}$$

Видно, что проведенное фторирование практически не приводит к изменениям в спектрах поглощения ионов Er^{3+} и незначительно снижает коэффициент поглощения в области основного колебания связи О–Н.

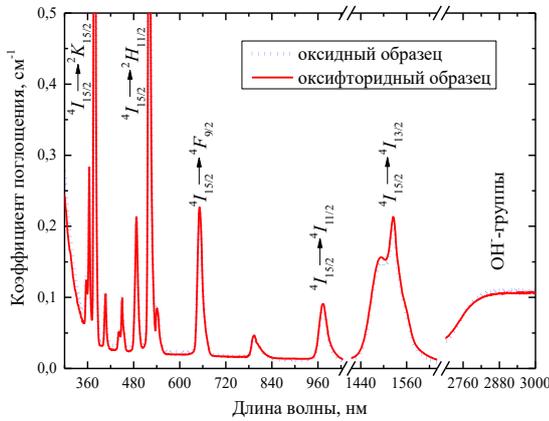


Рисунок 1 – Спектр поглощения стекла состава (мол. %) $5,0\text{Er}_2\text{O}_3-5,0\text{Y}_2\text{O}_3-30,0\text{Al}_2\text{O}_3-60,0\text{B}_2\text{O}_3$ до (синий) и после (красный) фторирования

Исследование спектрально-люминесцентных свойств Er -содержащих оксидных иттрий-алюмоборатных стекол показало, что данные материалы характеризуются интенсивной полосой люминесценции $4I_{13/2} \rightarrow 4I_{15/2}$ ионов Er^{3+} (рисунок 2, а) с эффективной полушириной ≈ 80 нм, положение и форма которой не изменяются при возбуждении в различных абсорбционных полосах. Введение фтора не приводит к уширению люминесцентной полосы $4I_{13/2} \rightarrow 4I_{15/2}$, но ведет к заметному увеличению ее интегральной интенсивности, которое в зависимости от используемой длины волны возбуждения составляет от 9 % до 19 % (рисунок 2, б). Данное увеличение логично объяснить ослаблением дезактивации энергетических состояний Er^{3+} примесными OH^- -группами из-за снижения их концентрации.

Таким образом, фторирование Er -содержащих иттрий-алюмоборатных стекол не приводит к структурным изменениям в стекле, но повышает интенсивность излучения ионов Er^{3+} в полосе $4I_{13/2} \rightarrow 4I_{15/2}$. Разработанные стекла являются перспективными лазерными средами и люминесцентными конверторами солнечного излучения.

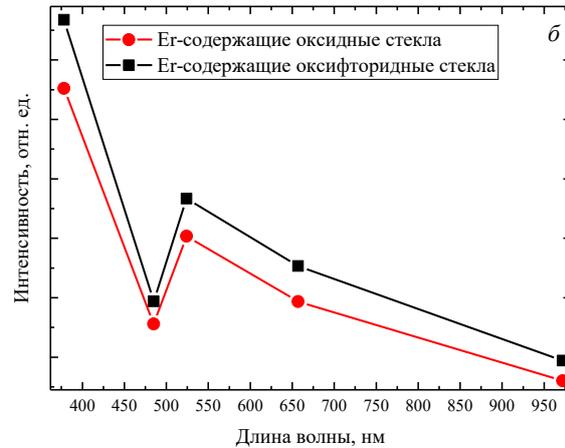
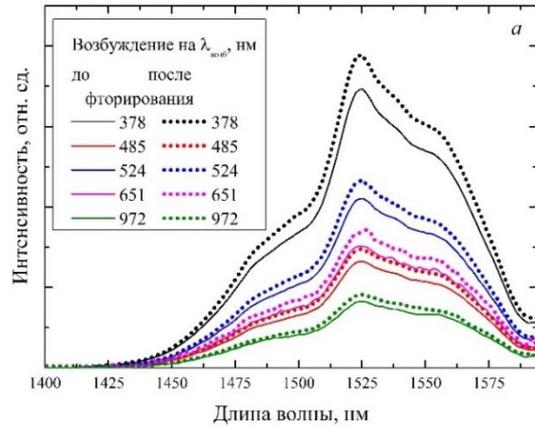


Рисунок 2 – Спектры ИК-люминесценции (а) и зависимость ее интегральной интенсивности (б) от длины волны возбуждения для стекла состава (мол. %) $5,0\text{Er}_2\text{O}_3-5,0\text{Y}_2\text{O}_3-30,0\text{Al}_2\text{O}_3-60,0\text{B}_2\text{O}_3$

Литература

1. Carnall, W. T. Electronic energy levels in the trivalent lanthanide aquo ions. I. Pr^{3+} , Nd^{3+} , Pm^{3+} , Sm^{3+} , Dy^{3+} , Ho^{3+} , Er^{3+} and Tm^{3+} / W. T. Carnall, P. R. Fields, K. Rajnak // J. Chem. Phys. – 1968. – V. 49, № 10. – P. 4424–4442.
2. Luminescence of borogermanate glasses activated by Er^{3+} and Yb^{3+} ions / G. E. Malashkevich [et al.] // J. Non-Cryst. Sol. – 2011. – V. 357, № 1. – P. 67–72.
3. Влияние условий синтеза и состава кварцевых гель-стеклол на ширину полосы люминесценции $4I_{13/2} \rightarrow 4I_{15/2}$ ионов Er^{3+} / Г. Е. Малашкевич // ЖПС. – 2023. – Т. 90, № 5. – С. 684–688.

УДК 535.5:551.551

**ОТКЛОНЕНИЕ ОСИ БЕССЕЛЕВА СВЕТОВОГО ПУЧКА, ПРОШЕДШЕГО
ЧЕРЕЗ ИМИТАТОР ТУРБУЛЕНТНОСТИ АТМОСФЕРЫ**

Рыжевич А. А.^{1,2}, Балькин И. В.¹, Макаревич А. П.¹, Железнякова Т. А.²

¹Институт физики НАН Беларуси

²Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В настоящее время лазерное излучение активно используется для исследования и диагностики состояния атмосферы, в том числе ее турбулентности. Исследовано влияние имитатора турбулентности атмосферы (ИТА) на отклонение оси бесселевых световых пучков (БСП) нулевого и первого порядка, проходящих через ИТА. Получено, что при наличии крупномасштабной турбулентности ось БСП отклоняется, причем линейное отклонение растет при увеличении продольной координаты. Оси БСП нулевого и первого порядка отклоняются похожим образом, но получать и анализировать БСП первого порядка сложнее, поэтому для исследования турбулентности атмосферы целесообразно применять БСП нулевого порядка.

Ключевые слова: гауссов световой пучок, бесселев световой пучок, атмосфера, турбулентность, имитатор турбулентности атмосферы.

**DEFLECTION OF AN AXIS OF A BESSEL LIGHT BEAM TRANSMITTED THROUGH
AN ATMOSPHERE TURBULENCE SIMULATOR**

Ryzhevich A.¹, Balykin I.¹, Makarevich A.¹, Zheleznyakova T.²

¹Institute of Physics of NAS of Belarus

²Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. At present, laser radiation is actively used to investigate and diagnose the state of the atmosphere, including its turbulence. The effect of atmosphere turbulence simulator (ATS) on the deviation of the axis of Bessel light beams (BLB) of the zero and the first order passing through ATS is studied. We found that in the presence of large-scale turbulence the BLB axis is deflected, and the linear deviation increases with an increase of the longitudinal coordinate. The axes of BLB of zero and first order are deflected similarly, but it is more difficult to obtain and analyze BLB of first order, therefore it is advisable to use BLB of the zero order to study atmospheric turbulence.

Key words: Gaussian light beam, Bessel light beam, atmosphere, turbulence, atmosphere turbulence simulator.

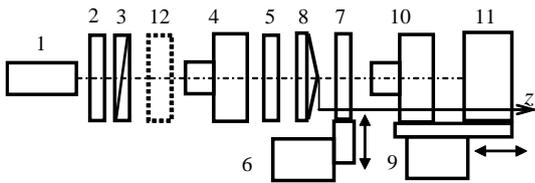
Адрес для переписки: Рыжевич А. А., пр. Независимости, 68-2, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: tol@dragon.bas-net.by

Введение. Бесселевы световые пучки (БСП) 0-го (БСП₀) и 1-го (БСП₁) порядков являются аксиально симметричными интерференционными световыми полями, радиальное распределение интенсивности в которых описывается квадратом функций Бесселя 1-го рода 0-го и 1-го порядков соответственно. В [1] было показано, что после прохождения исходного гауссова лазерного пучка через имитатор турбулентности атмосферы (ИТА) положение оси БСП, сформированного из исходного пучка, изменяется. В данной работе исследуется влияние ИТА на положение оси непосредственно проходящего через него БСП.

Экспериментальная установка. Нами была собрана экспериментальная установка для исследования влияния среды с неоднородностями на параметры БСП, сформированного из исходного гауссова либо лаггер-гауссова светового пучка. Конструкция экспериментальной установки схематически изображена на рисунке 1. Установка включает в себя гелий-неоновый лазер 1, формирующий гауссов световой пучок, поляризационный аттенюатор для плавной регулировки интенсивности света в исходном пучке, состоящий из полуволновой пластины 2 и поляризатора 3,

20/10/5/2-кратный расширитель/коллиматор 4 светового пучка, аттенюатор 5 на основе нейтральных стеклянных светофильтров, моторизованный для поперечного перемещения держатель 6 имитатора турбулентности атмосферы 7, аксикон 8 для формирования бесселева светового пучка, а также объединенные на одной отдельно моторизованной платформе 9 для продольного перемещения: микроскоп 10, и CCD-камера 11 для регистрации поперечного распределения интенсивности в формируемом БСП. На оси гауссова светового пучка опционально присутствует преобразователь 12 на основе двусосного кристалла для формирования лаггер-гауссова светового пучка, содержащего винтовую дислокацию волнового фронта, с целью получения после аксикона 8 БСП₁. Без преобразователя 12 аксиконом 8 формируется БСП₀.

Моторизованный держатель 6 использовался нами для имитации поперечного ветра в соответствии с моделью «замороженной» атмосферы. Внесение такой имитации необходимо в контексте анализа статистических свойств наблюдаемых параметров качества при анализе реальной атмосферы.



1 – лазер; 2 – полуволновая пластина; 3 – поляризатор;
4 – расширитель/коллиматор; 5 – аттенюатор;
6 – моторизованный держатель; 7 – ИТА; 8 – аксикон;
9 – моторизованная платформа; 10 – микроскоп;
11 – CCD-камера; 12 – опциональный формирователь
лазер-гауссова светового пучка

Рисунок 1 – Конструкция экспериментальной
установки для исследования влияния ИТА
на параметры БСП

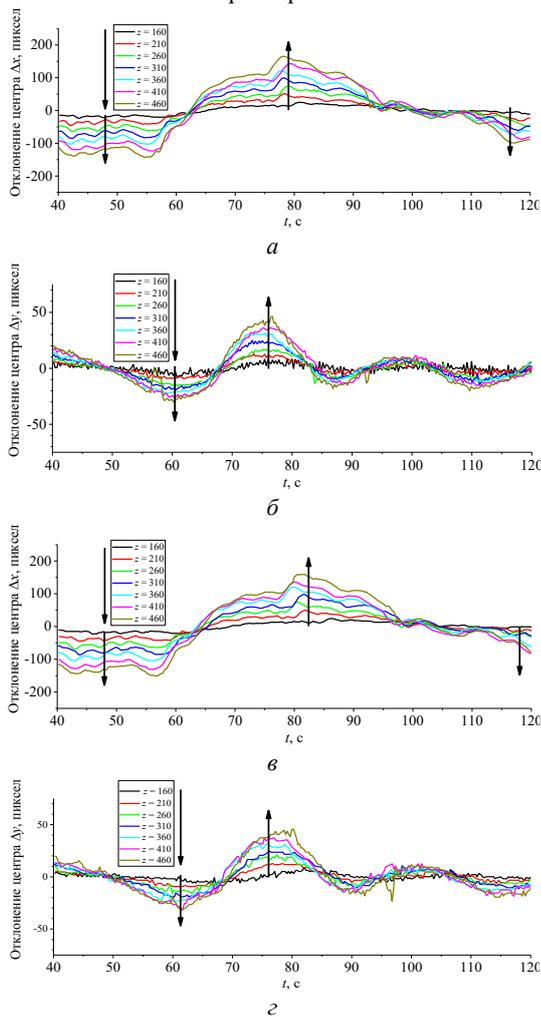


Рисунок 2 – Зависимость отклонения оси БСП₀ (а, б) и БСП₁ (в, г) от положения оси невозмущенного пучка по оси x (а, в) и по оси y (б, г) от времени сканирования для различных продольных координат

Положение оси БСП. Анализ параметров БСП, прошедшего через ИТА, производился после регистрации поперечных распределений интенсивности, формируемых на различных расстояниях z от

аксикона, в процессе поперечного перемещения имитатора атмосферы моторизованным держателем. Для последующей обработки нами были выбраны распределения при значениях продольной координаты от 160 до 460 мм с шагом 50 мм. Для определения положения оси на каждом кадре в силу особенностей распределения интенсивности в БСП₀ использовался метод моментов с учетом только пикселей, с интенсивностью большей, чем 0,8 от максимальной интенсивности на кадре. Для определения положения оси БСП₁ использовалась более сложная методика, детально описанная в [2]. На рисунке 2 показано, как изменяется с течением времени при линейном перемещении имитатора отклонение положения оси БСП₀ и БСП₁ относительно ее положения при отсутствии имитатора на разных расстояниях z от аксикона. Из рисунка 2 следует, что при наличии ИТА ось прошедшего через него БСП изменяет свое положение, причем линейное отклонение оси при прохождении пучка через одну и ту же область имитатора увеличивается с ростом продольной координаты.

Заключение. Наличие ИТА приводит к отклонению оси прошедшего через него БСП, которое можно измерять с большой точностью. Это дает возможность отслеживать крупномасштабную турбулентность прозрачной среды, размеры которой больше диаметра БСП, причем чувствительность данного метода возрастает при регистрации БСП на большем расстоянии от аксикона. Использование для этих целей более сложно формируемого и анализируемого БСП₁ не дает никаких преимуществ, поэтому в данном случае целесообразно применять БСП₀.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания 1.1 «Разработка методов и устройств диагностики материалов, процессов и изделий в оптическом и терагерцовом диапазонах спектра и их применение для оптической связи, микроскопии и определения характеристик различных объектов» (№ гос. рег. 20210300) ГПНИ «Фото-ника и электроника для инноваций» (2021-2025 гг.).

Литература

1. Балыкин, И. В. Влияние имитатора атмосферы на положение оси бесселева светового пучка, сформированного из гауссова пучка, прошедшего через имитатор / И. В. Балыкин, А. А. Рыжевич. // Современные проблемы физики: сб. науч. трудов междунар. школы-конф. молодых ученых и специалистов, Минск, 24–26 апреля 2024 г. / Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси; под ред. Д. С. Василевской, Е. С. Жарниковой. – Минск: Ковчег, 2024. – С. 9–11.
2. Рыжевич, А. А. Определение параметров качества бесселевых световых пучков высших порядков / А. А. Рыжевич, И. В. Балыкин, Т. А. Железнякова // Журнал прикладной спектроскопии. – 2021. – Т. 88, № 5. – С. 792–806.

УДК 616-77; 681.2

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ НИТИНЛОВЫХ ЭНДОПРОТЕЗОВ

Савченко А. Л., Волкова О. Н., Сатторов С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе приведены результаты исследования влияния температуры окружающей среды на результаты измерения механических характеристик эндопротезов сосудов из никелида титана. Выполнена оценка температурной составляющей погрешности измерения и даны рекомендации по использованию результатов в метрологической практике.

Ключевые слова: никелид титана, эндопротез, механические характеристики, температура, погрешность.

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE RESULTS OF MEASURING THE RIGIDITY OF NITINOL ENDOPROSTHESIS

Savchenko A., Volkova O., Sattorov S.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The paper presents the results of a study of the influence of ambient temperature on the results of measuring the mechanical characteristics of vascular endoprostheses made of titanium nickelide. An assessment of the temperature component of the measurement error is made and recommendations are given for using the results in metrological practice.

Key words: nickel titanium, endoprosthesis, mechanical characteristics, temperature, error

Адрес для переписки: Савченко А. Л., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: alsavchenko@bntu.by

Эндопротезы сосудов для кардиохирургии достаточно разнообразны по конструкции. К ним относятся как цельнометаллические пространственные конструкции, такие как стенты, кавалитры, окклюдеры, так и сборные устройства, помимо металлических включающие тканевые и другие элементы. К ним относятся стент-графты, клапан-содержащие стенты и др.

Отличительной особенностью многих эндопротезов является материал металлических элементов. Это никелид титана или нитинол, интерметаллид, соединение титана и никеля в примерном процентном соотношении 45 % Ti–55 % Ni. Этот материал обладает эффектом памяти формы, то есть требуемая форма изделия может быть получена путем термоформования – термообработки при определенных режимах, обеспечивающих нахождение при рабочей температуре в аутенитной фазе, обеспечивающей максимальную жесткость [1]. При термоформовании добиваются смещения точки фазового перехода в промежуток между температурой установки в систему доставки и температурой установки в кровеносный сосуд. В первом случае изгибная жесткость элементов минимальна, во втором максимальна [2, 3]. В результате изгибная жесткость элементов эндопротезов зависит от температуры. Это в некоторой степени усложняет контроль механических характеристик готовых элементов.

В производственных условиях радиальная и изгибная жесткость контролируется специальными техническими средствами, такими как тестер радиальных усилий RLU124 (Blockwise

Engineering LLC, США, рисунок 1) [4]. Достаточно сложная установка обладает широкими возможностями.

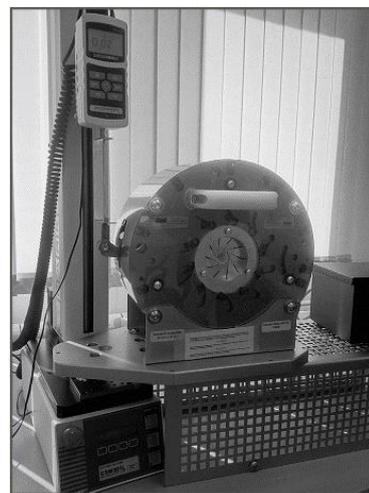


Рисунок 1 – Тестер RLU124

В [5] приведена методика измерения радиальной жесткости кольцевых элементов и изгибной жесткости проволоки с помощью специально разработанных устройств.

Особенностью рассматриваемых методик является проведение измерений в контролируемых температурных условиях. В частности, проводились исследования жесткости при температурах 15 °С, 37 °С и 42 °С. Это затрудняет методику измерений, особенно в производственных условиях. Гораздо проще было бы проводить измерения в

обычных лабораторных условиях, при комнатной температуре. Поэтому задачей исследования является оценка влияния температуры окружающего воздуха на результаты измерения изгибной жесткости проволоки.

Отправной точкой для исследований являлись результаты, ранее полученные авторами [5, 6] и результаты, изложенные в [7].

Были взяты образцы нитиноловой проволоки как из готовых стент-элементов из каркасов стентграфтов, производимых в Научно-технологическом парке БНТУ «Политехник» (рисунок 2), так и специально изготовленные и термообработанные Λ -образные элементы (рисунок 3). На рисунке 3 также показан элемент приспособления для измерения жесткости.

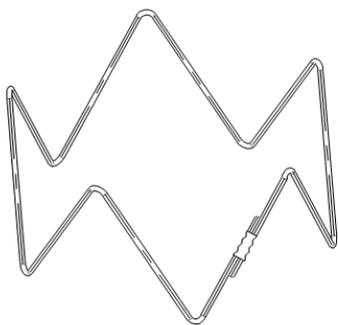


Рисунок 2 – Стент-элемент



Рисунок 3 – Изгибной элемент в приспособлении

Для создания температурно контролируемой среды измерения проводились в воде с требуемой температурой.

Для оценки температур фазовых переходов фрагменты проволоки из образцов подвергались исследованию с использованием дифференциального сканирующего калориметра DSC-3 (Mettler Toledo, США).

В результате исследований было установлено следующее.

Температуры фазовых переходов в разных образцах, несмотря на сходные условия термической обработки, имеют довольно большой разброс – от 16 °С до 27 °С. Вероятно, это вызвано плохой повторяемостью условий термообработки. Тем не менее, фазовые переходы наблюдаются в нужном для эксплуатации диапазоне между температурой установки в систему доставки 15 °С и температурой эксплуатации в кровеносном сосуде 37 °С.

Измерения жесткости при температурах выше температуры фазового перехода дают идентичные результаты, что согласуется с данными, приведенными в [7]. Это объясняется стабильностью механических характеристик нитинола в аустенитной фазе.

Можно сделать вывод, что для измерений механических характеристик изделий из нитинола можно специально не стабилизировать температурные условия, если обеспечить разброс температур фазовых переходов, укладываемый в диапазон ниже диапазона колебаний температуры в помещении для измерений. Для этого, вероятно, потребуется стабилизировать условия термической обработки.

Литература

1. Никелид титана. Медицинский материал нового поколения / В. Э. Гюнтер [и др.]. Томск: МИЦ, 2006. – 296 с.
2. Рубаник, В. В. Оптимизация режимов термообработки TiNi проволоки медицинского назначения / В. В. Рубаник, С. Н. Милюкина, В. В. Рубаник (мл.) // Материалы 8-й Междунар. конф. передовой обработки в машиностроении, Болгария, 18–20 июня 2008 г. Краево, 2008. – С. 199–203.
3. Shape Memory Alloy Shape Training Tutorial. A Teacher's Guide to Teaching Shape Memory Alloy Shape Training / L. Case [et al.] // ME559 – Smart Materials and Structures, University of Michigan. – 2004.
4. Тестирование in vitro прототипа митрального биопротеза для транскатетерной имплантации по методике «клапан-в-клапан» / А. В. Богачев-Прокофьев [и др.] // Клини. и эксперимент. хир. Журн. им. акад. Б. В. Петровского. – 2018. – № 1. – С. 77–83.
5. Минченя, В. Т. Оценка механических характеристик эндопротезов сосудов / В. Т. Минченя, А. Л. Савченко, Н. Т. Минченя // Наука и техника. – 2017. – Т. 16, № 5. – С. 400–406.
6. Разработка методики оценки радиальной жесткости эндоваскулярных стент-графтов / В. Т. Минченя [и др.] // Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб. Минск: БНТУ, 2012. – Вып. 27. – С. 137–141.
7. Ab ovo: factors affecting the radial stiffness of thoracic aorta stent-grafts / I. Yu. Zhuravleva [et al.] // Sovremennye tehnologii v medicine – 2021. – V. 13 (1). – P. 17–26.

УДК 616-77;681.2

ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕНТГРАФТОВ ПРИ ХРАНЕНИИ В СИСТЕМЕ ДОСТАВКИ

Савченко А. Л., Турочкин К. А., Сатторов С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе приведены результаты исследования влияния длительности хранения нитиноловых стентграфтов в сжатом виде в системе доставки на их размеры и ухудшение механических характеристик. Показано, что при существующих режимах термической обработки длительное нахождение в деформированном состоянии приводит постепенному ухудшению геометрических и механических характеристик.

Ключевые слова: никелид титана, стентграфт, хранение, механические характеристики, геометрические характеристики.

CHANGES IN THE CHARACTERISTICS OF STENTGRAPHS DURING STORAGE IN THE DELIVERY SYSTEM

Savchenko A., Turochkin K., Sattorov S.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The paper presents the results of a study of the effect of storage time of nitinol stent grafts in a compressed form in a delivery system on their dimensions and deterioration of mechanical characteristics. It is shown that under existing heat treatment conditions, prolonged storage in a deformed state leads to a gradual deterioration of geometric and mechanical characteristics.

Key words: nickel titanium, stent graft, storage, mechanical characteristics, geometric characteristics.

Адрес для переписки: Савченко А. Л., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: alsavchenko@bntu.by

Эндопротезы сосудов для кардиохирургии достаточно разнообразны по конструкции. К ним относятся как цельнометаллические пространственные конструкции, такие как стенты, кавалитры, окклюдеры, так и сборные устройства, помимо металлических включающие тканевые и другие элементы. К ним относятся стент-графты, клапан-содержащие стенты и др.

Стентграфт – система внутрисосудистого эндопротеза, включающая протез сосуда (графт) и закрепленный в нем пружинный каркас (стент-элементы) (рисунок 1). Используется при лечении аневризм аорты.



Рисунок 1 – Стентграфт E-vita

Отличительной особенностью многих эндопротезов является материал металлических элементов. Это никелид титана или нитинол, интерметаллид, соединение титана и никеля в примерном процентном соотношении 45 % Ti–55 % Ni. Этот материал обладает эффектом памяти формы, то есть ранее зафиксированная при термической обработке форма изделия может быть восстанов-

лена нагревом до температуры фазового перехода [1]. Для стентграфтов рабочей температурой является температура внутри кровеносного сосуда, то есть 37 °С.

Установка стентграфта в артерию осуществляется системой доставки. Она представляет собой систему телескопических пластиковых трубок с тканевым или пластиковым чехлом на конце. В чехле располагается стентграфт в сжатом (крипированном) состоянии. Например, стентграфт диаметром 30 мм обжимается до установки в чехол диаметром 6–8 мм. При выталкивании стентграфта из чехла в месте установки он расширяется и под воздействием окружающей температуры принимает заданную форму (рисунок 2).



Рисунок 2 – Выход стентграфта из системы доставки [2]

В систему доставки стентграфт устанавливается в процессе комплектации изделия, помещается в упаковку и вместе с ней подвергается стерилизации. До момента использования система аортального стентграфта может храниться достаточно длительное время.

В ходе производственных исследований в Научно-технологическом парке БНТУ «Политехник» было отмечено, что у некоторых стентграфтов, извлеченных из системы доставки после нескольких месяцев хранения, уменьшается размер в раскрытом состоянии, снижается радиальная жесткость. В некоторых случаях эти эффекты проявляют себя неравномерно по окружности, в результате чего раскрытый стентграфт имеет отклонения от осевой симметрии.

Для исследования этого эффекта были взяты образцы одинаковых стент-элементов для системы аортального стентграфта (рисунок 3), изготовленные с различными режимами термической обработки.

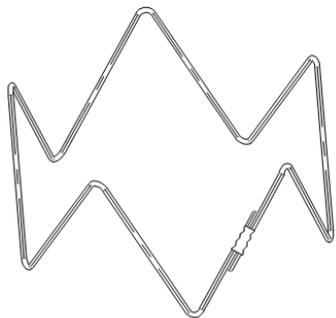


Рисунок 3 – Стент-элемент

Все образцы были термообработаны при одинаковой температуре, в течение одинакового времени, с одинаковым режимом охлаждения. Отличительными особенностями являлись способы размещения проволоки на оправке (рис. 4) и количество установленных на нее заготовок.

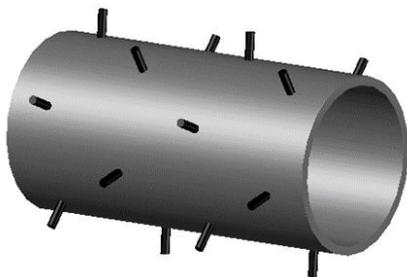


Рисунок 4 – Оправка для термической обработки

Все заготовки были помещены в металлические трубки диаметром 8 мм, имитирующие чехол системы доставки. В течение 6 месяцев образцы выдерживались в кримпированном состоянии с ежемесячным извлечением и контролем диаметра и радиальной жесткости в соответствии с ранее предложенной методикой [3]. Хранение осуществлялось при комнатной температуре. Процесс выталкивания образца из трубки сни-

маялся на видео для оценки сохранения осевой симметрии. Измеренные значения диаметра и радиальной жесткости сравнивались с исходными.

В ходе исследований установлено следующее.

Первые изменения в диаметре и радиальной жесткости стали появляться через два месяца хранения, до этого заметных изменений не происходило.

За шесть месяцев хранения максимальное уменьшение диаметра составило около 5 % и наблюдалось через четыре месяца. В последние два месяца изменения диаметра не наблюдались.

Снижение радиальной жесткости проявилось через два месяца и продолжалось в течение всего периода исследования. Максимальное снижение составило около 15 %.

Наиболее склонными к деградации характеристик оказались элементы, которые термообработывались на многоместном приспособлении.

У некоторых образцов после четырех месяцев хранения стала появляться несимметрия формы и механических характеристик. Этот эффект оказался никак не связан с характером термообработки стент-элементов. Мы предполагаем, что причиной является деградация материала в местах наличия дефектов в структуре материала.

На основе полученных результатов сформирован план дальнейших исследований. Он включает следующие направления.

Планируется увеличить время выдержки образцов в кримпированном состоянии, в частности, продолжить работу с исследуемыми стент-элементами.

Планируется проверить, как влияет на геометрические и механические характеристики нитиноловых элементов температура хранения. Помимо комнатной температуры образцы будут храниться при температурах холодильной и морозильной камер. Вероятно, нагрев при хранении выше комнатной температуры нецелесообразен, так как может быть превышена температура фазового перехода.

Также планируется исследование дефектов структуры и их влияние на изменение симметрии при хранении.

Литература

1. Никелид титана. Медицинский материал нового поколения / В. Э. Гюнтер [и др.]. Томск: МИЦ, 2006. – 296 с.
2. Percutaneous Stent Graft Aids Thoracic Aorta Repairs [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://mobile.hospimedica.com/surgical-techniques/articles/294775598/percutaneous-stent-graft-aids-thoracic-aorta-repairs.amp.html>.
3. Минченя, В. Т. Оценка механических характеристик эндопротезов сосудов / В. Т. Минченя, А. Л. Савченко, Н. Т. Минченя // Наука и техника. – 2017. – Т. 16, № 5. – С. 400–406.

УДК 616-77;539.4

К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ФИЛЬТРА-ЛОВУШКИ

Савченко А. Л.¹, Шумская А. П.²

¹Белорусский национальный технический университет

²ООО «Точная механика»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе приведены результаты теоретического исследования нагрузок при извлечении фильтра-ловушки из вены. Рассмотрены расчеты усилия извлечения и прочности зацепа тубулярного фильтра. Результаты расчетов могут быть использованы при проектировании эндопротезов сосудов.

Ключевые слова: фильтр-ловушка, извлечение, усилие, прочность, проектирование.

ON THE QUESTION OF DESIGNING CAVA-FILTER ELEMENTS

Savchenko A., Shumskaya A.

¹Belarusian National Technical University

²«Mechanica»

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The paper presents the results of a theoretical study of loads during extraction of a cava-filter from a vein. Calculations of the extraction force and the strength of the tubular filter hook are considered. The calculation results can be used in designing vascular endoprotheses.

Key words: cava-filter, extraction, effort, strength, design.

Адрес для переписки: Савченко А. Л., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: alsavchenko@bntu.by

Фильтр-ловушка (cava-фильтр) – проволочная конструкция, устанавливаемая в просвет кровеносного сосуда (вены) и предназначенная для улавливания сгустков крови.

Фильтры ловушки должны иметь в конструкции зацепы для фиксации в сосуде, поэтому их получение из цельного куска проволоки гибкой или плетением затруднительно.

Тубулярные фильтры-ловушки вырезают целиком из нитиноловой трубки и раскрывают на манер китайского фонарика. Полученную форму фиксируют в печи. Примером может служить фильтр-ловушка Optease Retrieable Vena-cava-Filter (Cordis, USA), показанный на рисунке 1 [1].

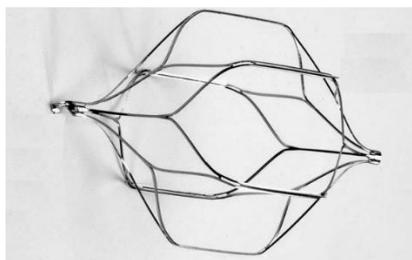


Рисунок 1 – Тубулярный фильтр-ловушка

Сборные фильтры-ловушки имеют достаточно много разновидностей, при этом у них вполне однотипная конфигурация – расходящийся пучок проволочек.

Фильтр находится в вене до трех месяцев, после чего должен быть удален. Для удаления в яремную вену на шею вставляется специальная трубочка. Используя рентгеноскопию, врач проводит специальную самозатягивающуюся петлю, которая набрасывается на крючок кава-фильтра.

После успешного захвата петля втягивается в трубку, кава-фильтр складывается как зонтик и извлекается наружу. При этом прочность крючка должны быть достаточна для преодоления усилия, необходимого для извлечения без разрушения.

В материале приводятся результаты теоретического исследования нагрузки для извлечения фильтра-ловушки и прочности крючка-зацепа для тубулярного фильтра, изготавливаемого резкой из нитиноловой трубки в условиях Научно-технологического парка БНТУ «Политехник». На рисунке 2 показана заготовка фильтра после лазерной резки, на рисунке 3 – фильтр в раскрытом состоянии [2].



Рисунок 2 – Заготовка после лазерной резки

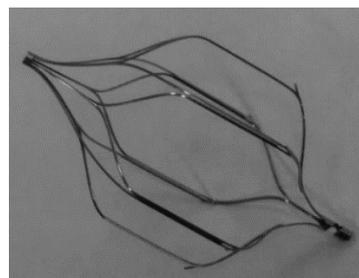


Рисунок 3 – Раскрытый фильтр-ловушка

Усилие, требуемое для извлечения фильтра из вены складывается из следующих составляющих:

- отделение фиксирующих элементов от стенок вены;
- деформация элементов фильтра при стягивании в трубку;
- трение фильтра о стенки трубки.

Отделение фиксирующих элементов от стенок вены в некоторых случаях может стать достаточно затруднительным и выполняется специальными инструментами в ходе операции [3]. В случае проектного расчета можно ввести коэффициент, определяемый анализом статистических данных, которые предстоит набрать при выполнении операций.

Сила, вызванная деформацией элементов фильтра при стягивании в трубку определяется размерами трубки и элементов фильтра. Расчетная схема показана на рисунке 4.

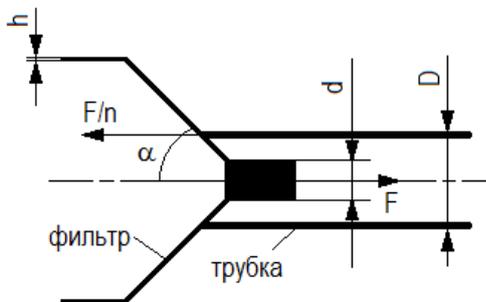


Рисунок 4 – Схема расчета усилия втягивания

Величину деформации можно определить по формуле:

$$f = \frac{nPl^3}{3EJ}, l = \frac{D-d}{2\sin\alpha}, J = \frac{bh^3}{12},$$

где $P = F\cos\alpha/n$ – усилие, приходящееся на один изгибный элемент фильтра, n – число изгибных элементов, F – усилие, приложенное к фильтру при его удалении; l – длина плеча приложения нагрузки при изгибе; E – модуль упругости нитинола в состоянии сверхупругости, J – момент инерции поперечного сечения изгибного элемента, b – ширина изгибного элемента, h – толщина изгибного элемента. При расчете максимального усилия все геометрические размеры следует задавать для начального (недеформированного) состояния, требуемая деформация, очевидно, принимается как $f = (D-d)/2$. Для учета возможного смещения фильтра в пределах зазора в трубке выражение для длины плеча может быть принято как:

$$l = \frac{H}{2\sin\alpha},$$

где H – толщина стенки трубки.

Сила трения фильтра о стенки трубки определяется как $F_{тр} = nP\mu$, где μ – коэффициент трения в контакте нитинолового фильтра и трубки из нержавеющей стали.

Суммарное усилие втягивания фильтра в трубку

$$F_c = (F + F_{тр} + KF),$$

где K – коэффициент, учитывающий силу отделения фильтра от стенок кровеносного сосуда (вены).

Величина суммарного усилия может быть рассчитана для проверки прочности крючка-зацепа при проектировании фильтра.

Крючок при удалении фильтра должен быть проверен на разрыв и срез в месте контакта с петлей для извлечения. Так как форма крючка обеспечивает симметричное нагружение, а цилиндрическая форма имеет высокую изгибную жесткость, проверка на изгиб может не выполняться. Условие прочности на разрыв

$$\sigma = \frac{F_c}{A_p} \leq [\sigma], A_p = \frac{\pi(d - d_1)^2}{4},$$

где A_p – площадь разрыва, равная площади поперечного сечения трубки-заготовки для фильтра; d_1 – внутренний диаметр трубки-заготовки.

Условие прочности на срез

$$\tau = \frac{F_c}{A_c} \leq [\tau], A_c = d_n(d - d_1),$$

где A_c – площадь среза, равная площади контакта петли с трубкой-заготовкой для фильтра; d_n – диаметр проволоки петли.

Полученные расчетные формулы могут быть использованы в расчетах при проектировании фильтров-ловушек.

Литература

1. Hoppe, H. Optional Vena Cava Filters. Indications, Management, and Results / H. Hoppe // Dtsch Arztebl Int. – 2009. – № 106 (24). – P. 395–491.
2. 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 (заключительный) : ГБ 14-91 / Белорусский национальный технический университет (Минск); рук. В. Т. Минченя; исполн. А. Л. Савченко, Н. Т. Минченя, А. Ю. Королев, М. И. Филонова. – Электрон. дан. – Минск: [б. и.], 2015. – N ГР 20141055.
3. Однопросветная унилатеральная техника удаления кавы-фильтра / А. Г. Виллер [и др.] // Вестник Национального медико-хирургического Центра им. Н. И. Пирогова. – 2018. – Т. 13, № 3. – С. 141–143.

УДК 535.37

ЛАЗЕРНЫЙ СПЕКТРОФЛУОРИМЕТР ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКОГО ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА

Самцов М. П.¹, Тарасов Д. С.^{1,2}, Радзько А. Е.¹, Шевченко К. А.¹, Кирсанов А. А.², Воропай Е. С.²

¹НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко»
Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработан и изготовлен лазерный спектрофлуориметр для спектрально-кинетического люминесцентного анализа, который позволяет регистрировать стационарный спектр флуоресценции, кинетику затухания флуоресценции по методу время-коррелированного счета одиночных фотонов при возбуждении импульсным лазерным источником света.

Ключевые слова: спектрофлуориметр, спектрально-кинетический люминесцентный анализ, время-коррелированный счет одиночных фотонов.

LASER SPECTROFLUOROMETER FOR SPECTRAL-KINETIC LUMINESCENT ANALYSIS

Samtsov M.¹, Tarasov D.^{1,2}, Radzko A.¹, Shevchenko K.¹, Kirsanov A.², Voropay E.²

¹A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University
²Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The laser spectrofluorometer for spectral-kinetic luminescence analysis has been developed and manufactured, which allows recording a stationary fluorescence spectrum, fluorescence decay kinetics using the time-correlated single photon counting method when excited by a selected pulsed light source.

Key words: spectrofluorometer, spectral-kinetic luminescence analysis, time-correlated single photon counting.

Адрес для переписки: Д. С. Тарасов, ул. Курчатова 7, 220045 г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: dmitrij-tarasov@list.ru

Науки о жизни (от англ. life sciences) сегодня являются одними из приоритетных направлений развития науки и технологий во всем мире. Успехи здесь определяются главным образом доступом к современному аналитическому оборудованию, которое позволяет получать большой объем информации о строении и функционировании различных биобъектов. В этом отношении хорошо себя зарекомендовал люминесцентный анализ как один из наиболее информативных спектральных методов исследования объектов в различных областях науки [1]. В последние два десятилетия его применение значительно расширилось ввиду развития аппаратуры для измерения временных характеристик свечения люминесценции. Прежде всего это обусловлено появлением мегагерцовых импульсных лазерных источников с субнаносекундной и пикосекундной длительностью, а также развитием микроэлектронной базы и ростом вычислительных возможностей.

Использование спектрально-кинетического люминесцентного анализа в оптико-физических, исследованиях позволяет получать существенно более обширную информацию об изучаемых системах по сравнению с чисто спектральными измерениями [1]. Актуальность использования аппаратуры для временного анализа спектрально-люминесцентных параметров обусловлена тем, что для детального анализа многих процессов, основанного на регистрации спектров поглощения и испускания флуоресцентных зондов, которые в большинстве случаев являются широкопо-

лосными и бесструктурными, таких характеристик недостаточно. При совпадении спектров люминесценции более информативным в этом случае оказываются кинетические параметры испускания. На базе измерений спектрально-кинетических параметров обеспечивается изучение молекулярной структуры белков и мембран, механизмов переноса ионов в мембранах, механизмов аллергических реакций и многие другие. Высокая чувствительность люминесцентного анализа позволяет определять с его помощью малые концентрации биологически важных веществ, определять патологические изменения биотканей и биоорганизмов.

Несмотря на актуальность исследований с высоким временным разрешением, аппаратура подобного рода в Республике Беларусь серийно не выпускается. В данной работе описан разработанный и созданный лазерный спектрофлуориметр для спектрально-кинетического люминесцентного анализа в экспериментальной физике и биологии.

Разработанный лазерный спектрофлуориметр позволяет регистрировать стационарный спектр флуоресценции и кинетику затухания флуоресценции по методу время-коррелированного счета одиночных фотонов образцов при возбуждении выбранным импульсным источником света. Комплекс ориентирован на решение широкого круга задач спектрально-кинетического люминесцентного анализа. Соответствуя по своим характеристикам аналогичным изделиям зарубежных фирм

(Horiba, Япония; Edinburg Instruments Ltd., Великобритания; PicoQuant, Германия), он имеет значительно меньшую стоимость.

При построении прибора в основу положен модульный принцип. Это позволяет легко реализовать такую конфигурацию спектрофлуориметра, которая требуется для конкретных физико-технических приложений. С другой стороны, посредством совершенствования отдельных ключевых узлов можно улучшать параметры аппаратуры в целом. Помимо этого, существуют возможности замены в составе комплекса узлов со схожим функциональным назначением, но существенно иными параметрами.

Принципиальная схема спектрофлуориметра состоит из трех функционально законченных частей: оптико-механического блока, электронного блока и персональной электронно-вычислительной машины для выполнения специального программного обеспечения для управления спектрофлуориметром и анализа кинетики затухания флуоресценции. В составе спектрофлуориметра имеются сменные импульсные источники возбуждения (лазерные и светодиодные), камера образцов, монохроматор M150 (Solar LS, Беларусь), одноквантовое фотоприемное устройство и многоканальное фотоприемное устройство. В спектрометр включен набор из нескольких лазерных и светодиодных источников света собственной разработки, которые покрывают спектральный диапазон 250–760 нм (рисунок). Последнее позволило обойтись без монохроматора возбуждения, что упростило и удешевило комплекс без ущерба для параметров. Импульсный режим источников света реализован посредством оригинального схемотехнического решения. Созданные импульсные источники могут работать в пико- и нано- режимах, с характерными длительностями импульса 0,2–0,5 и 1,5–3,0 нс. Реализована возможность регулировки частоты следования импульсов от килогерца до нескольких мегагерц, что необходимо для обеспечения возможности исследования люминесценции с микросекундного или наносекундного диапазонов.

В качестве основы одноквантового фотоприемного устройства использован фотоумножитель Hamamatsu R928 (Япония), многоканальное фотоприемное устройство разработано на базе КМОП-детектора Hamamatsu S13496 (Япония). В результате в сочетании с монохроматором M150 обеспечена возможность исследования люминесценции в монохроматорном режиме – 200–830 нм, в полихроматорном режиме – 200–1000 нм.

Разработан и изготовлен электронный блок, который обеспечивает управление источником высоковольтного напряжения для фотоумножителя, регистрацию и анализ сигнала с него. Для регистрации кинетики затухания флуоресценции

в режиме время-коррелированного счета фотонов в спектрофлуориметр включена схема временной привязки и время-амплитудный преобразователь. Внедрение данного лазерного спектрофлуориметра в учебный процесс позволит поднять на современный уровень знания студентов, магистрантов и аспирантов в области аналитического спектрального оборудования со следующими техническими характеристиками: диапазон измеряемых времен затухания свечения – 0,2–10000 нс; временное разрешение – 0,1 нс; длины волн светодиодных источников возбуждения – 260 нм, 285 нм, 350 нм; длины волн лазерных источников возбуждения – 405 нм, 450 нм, 515 нм, 650 нм, 780 нм; спектральный диапазон регистрации излучения в монохроматорном режиме 200–830 нм и в полихроматорном 200–1000 нм; динамический диапазон по фотометрической шкале в монохроматорном режиме 10^6 .

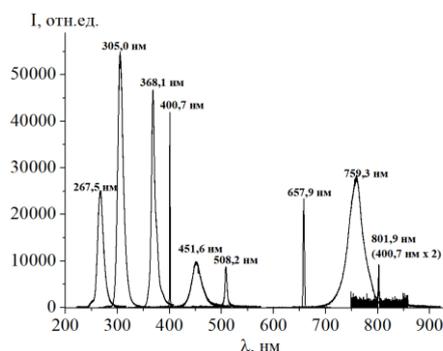


Рисунок – Спектры лазерных и светодиодных импульсных источников возбуждения

Разработано программного обеспечения (ПО) для объединения отдельных узлов в единый программно-аппаратный комплекс. ПО спектрофлуориметра позволяет организовать управление монохроматором M150 и электронным блоком, что обеспечивает высокую степень автоматизации при регистрации и обработки стационарных спектров и кинетики затухания флуоресценции. В ПО спектрофлуориметра включен разработанный программный модуль «ФлуоТау» для анализа кинетики затухания флуоресценции, зарегистрированной по методу время-коррелированного счета одиночных фотонов. В его основе нелинейный метод наименьших квадратов. Модуль «ФлуоТау» позволяет аппроксимировать зарегистрированную кинетику затухания флуоресценции суммой до 5 экспонент, имеет широкие возможности предварительной обработки кинетики и настройки модели аппроксимации.

Литература

1. Jameson, D. M. Fluorescence: Basic concepts, practical aspects, and some anecdotes / D. M. Jameson, J. C. Croney, P. D. J. Moens // *Methods in Enzymology*. – 2003. – V. 360. – P. 1–43.

УДК 621

РАСЧЕТ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ЗАГОТОВОК В УСТАНОВКЕ ДЛЯ ИХ СТАБИЛИЗАЦИИ

Сандомирский С. Г.¹, Яворский В. В.², Антонок В. Е.¹, Солдатенков В. И.³

¹ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

²ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ»
Жодино, Республика Беларусь

³ОАО «КУЗЛИТМАШ», Пинск, Республика Беларусь

Аннотация. Приведена информация о разрабатываемой установке для стабилизации размеров кольцевых заготовок малой жесткости после кольцераскатки и снижения остаточных напряжений в них. В основу расчетов силовых параметров циклического нагружения кольцевой заготовки положено математическое моделирование операции нагружения кольцевой заготовки радиальными усилиями. Проанализированы схемы нагружения кольцевой заготовки по внутреннему диаметру разным количеством (2, 3, 6, 8) радиальных усилий. Показано, что расчетные и моделированные напряжения на внутреннем диаметре кольцевой заготовки хорошо совпадают. Результаты расчетов предназначены для разработки технологического обеспечения автоматизированного кольцераскатного комплекса ОАО «БЕЛАЗ – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ».

Ключевые слова: кольцераскатка, кольцевая заготовка, остаточные напряжения, циклическое нагружение, динамическая стабилизация.

CALCULATION OF FORCE PARAMETERS OF CYCLIC LOADING OF RING BILLETS IN THE INSTALLATION FOR THEIR STABILIZATION

Sandomirski S.¹, Yavorski V.², Antonyuk V.¹, Soldatenkov V.³

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus
Minsk, Republic of Belarus

²OJSC «BELAZ» – Management Company of Holding «BELAZ-HOLDING»
Zhodino, Republic of Belarus

³JSC «KUZLITMASH»
Pinsk, Republic of Belarus

Abstract. Advantages and problems of ring rolling production are described. The method of controlled cooling – cyclic loading of the ring while cooling down – is proposed to improve the accuracy of manufacturing of low-stiffness rings and to reduce residual stresses in them. Its advantage over other types of dressing is explained. Recommendations are given on creation of experimental installation for elimination of deformations arisen in the process of production of low-stiffness rings and removal of residual stresses in them. The developed recommendations are used in the design of the installation. They will ensure the implementation of the technique of controlled cooling of low-stiffness rings during their production by ring rolling at the Belarusian Automobile Plant.

Key words: ring rolling, ring billet, residual stresses, cyclic loading, dynamic stabilisation.

Адрес для переписки: Сандомирский С. Г., ул. Академическая, 12, г. Минск 220012, Республика Беларусь
e-mail: sand_work@mail.ru

Производство маложестких кольцевых заготовок – одно из актуальных направлений машиностроения. Основной технологии их изготовления является кольцераскатка [1], при которой возникает геометрическая погрешность в виде овальности. Кроме того, при механической и термической обработках деталей возникают остаточные напряжения, изменяющие геометрические размеры и форму изделий при эксплуатации. Для решения задачи стабилизации размеров и снижения остаточных напряжений таких заготовок предложена технология их стабилизации [2], основанная на использовании циклического нагружения заготовок. Для ее реализации на основании патента [3] разработана экспериментально-производственная установка (рисунок 1) для устранения возникших в процессе производства маложестких колец деформаций и снятия остаточных напряжений в них [4].

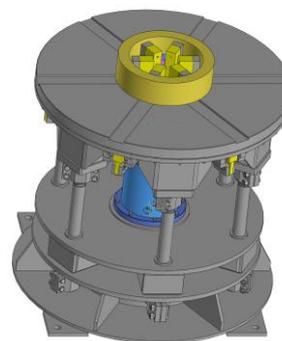


Рисунок 1 – Внешний вид (изометрия) экспериментально-производственной установки

Цель доклада – моделирование нагружения кольцевой заготовки для определения режимов работы установки.

Для принятой схемы нагружения изгибающий момент M_ϕ и нормальное усилие N_ϕ в сечении кольца определяются по зависимостям [5]:

$$M_\phi = P r \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{\cos((\alpha/2)-\phi)}{2 \sin(\alpha/2)} \right), \quad (1)$$

$$N_\phi = \frac{P}{2 \sin(\alpha/2)} \cos\left(\frac{\alpha}{2} - \phi\right), \quad (2)$$

где P – радиальная сила; n – их число; r – радиус кольца; $\alpha = \frac{2\pi}{n}$ – угол силами.

Напряжение изгиба равно:

$$\sigma_u = \frac{M_u}{W}, \quad (3)$$

где $W = hs^2/6$ – момент сопротивления сечения кольца; s – ширина сечения кольца; h – высота кольца.

Нормальное напряжение растяжения от действия нормального усилия N равно:

$$\sigma_p = \frac{N}{F}, \quad (4),$$

где $F = h \cdot s$ – площадь сечения кольца.

Моделирование проведено с использованием программного обеспечения «Компас 3D» для колец разной жесткости радиальными усилиями $P = 500$ кН с 2, 3, 6 и 8 позиционными схемами нагружения. На рисунках 2 и 3 приведены примеры моделирования 3 и 6 позиционных схем нагружения кольца $462 \times 367 \times 135$ мм из стали 40ХМФА.

Проведенный расчет для этого кольца и колец размером $392 \times 340 \times 36$ мм, $480 \times 370 \times 135$ мм из сталей 40ХМФА и 40ХН показал, что с увеличением количества радиальных сил значения максимального изгибающего момента уменьшаются, а значения максимальных усилий растяжения увеличиваются.

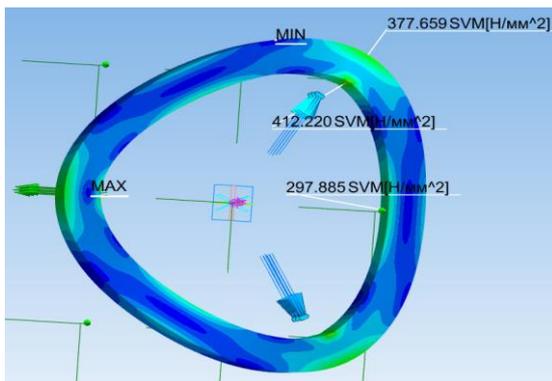


Рисунок 2 – 3-х плунжерная модельная схема нагружения кольца $462 \times 367 \times 135$

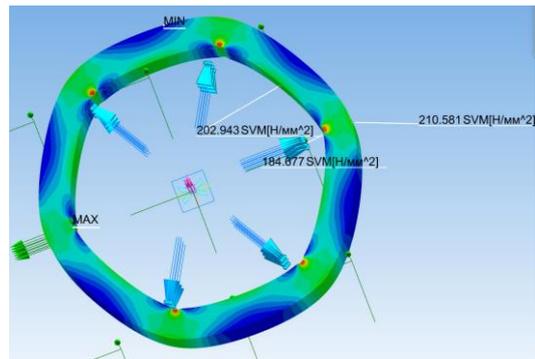


Рисунок 3 – 6-ти плунжерная модельная схема нагружения кольца $462 \times 367 \times 135$

Анализ суммарных расчетных и моделированных напряжений для трех моделируемых колец позволил сделать выводы:

- суммарные расчетные и моделированные напряжения в расчетной точке между усилиями P на внутреннем диаметре кольца имеют полное совпадение;

- суммарные расчетные и моделированные напряжения в расчетной точке под усилиями P на внутреннем диаметре кольца имеют почти полное совпадение для схемы нагружения с 2-мя радиальными усилиями и небольшое расхождение для схем с 3 и 6 радиальными усилиями, которое объясняется тем, что расчет суммарного напряжения под усилиями P на внутреннем диаметре кольца не учитывает действия контактных напряжений.

Литература

1. Антонюк, В. Е. Кольцеракатка в условиях автоматизированного производства / В. Е. Антонюк, П. А. Пархомчик, В. В. Рудый. – Мн.: Беларуская навука, 2021. – 245 с.
2. Антонюк, В. Е. Динамическая стабилизация маложестких колец после кольцеракатки / В. Е. Антонюк, С. Г. Сандомирский // Механика машин, механизмов и материалов. – 2020. – № 3 (52). – С. 34–41.
3. Способ стабилизации формы и размеров маложесткого осесимметричного изделия: пат. на изобретение 23995 Респ. Беларусь, МПК В21D 3/08 / В. Е. Антонюк, В. В. Рудый, В. В. Яворский, С. Г. Сандомирский; заявитель: ОИМ НАН Беларуси. Заявл. 29.07.2021; опубл. 30.04.2023.
4. Антонюк, В. Е. Экспериментально-производственная установка для управляемого охлаждения маложестких колец / В. Е. Антонюк, В. В. Яворский, С. Г. Сандомирский // Приборостроение – 2023: Материалы 16-й межд. научно – технической конференции, Минск, 15–17 ноября 2023 / Мн.: БНТУ. – С. 260–261.
5. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин. Справочное пособие / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Р. М. Шнейдерович. – М.: «Машиностроение», 1966. – 616 с.

УДК 620.179.14

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНУТРЕННЕГО КОЭФФИЦИЕНТА РАЗМАГНИЧИВАНИЯ СТАЛЕЙ ПО ИХ МАГНИТНЫМ ПАРАМЕТРАМ

Сандомирский С. Г.

ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Внутренний коэффициент N_i размагничивания обусловлен неоднородностями в структуре материала. Поэтому N_i позволяет достоверно судить о физико-механических свойствах сталей. Но для определения N_i проводят цикл сложных магнитных воздействий на термически размагниченный материал и прецизионных измерений его намагниченности. В докладе для упрощения определения N_i на основании достоверных физических предпосылок разработана формула, использующая результаты измерения коэрцитивной силы, остаточной намагниченности и намагниченности технического насыщения материала, которые можно измерить стандартными методами. С использованием разработанной формулы по справочным данным о магнитных параметрах стали 30 показана возможность контроля по N_i ее твердости во всем диапазоне ее изменения. Область применения – неразрушающий контроль физико-механических свойств сталей.

Ключевые слова: магнитный структурный анализ, ферромагнитные материалы, магнитные свойства, безгистерезисное намагничивание, внутренний коэффициент размагничивания.

EXPERIMENTAL AND PRODUCTION PLANT FOR CONTROLLED COOLING OF LOW RIGID RINGS

Sandomirski S.

Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The internal demagnetization coefficient N_i is due to inhomogeneity's in the material structure. Therefore, N_i allows to reliably judge the physical and mechanical properties of steels. But to determine N_i , a cycle of complex magnetic effects on thermally demagnetized material and precisions measurements of its magnetization are carried out. In the report, to simplify the determination of N_i on the basis of reliable physical assumptions, a formula is developed using the results of measuring the coercivity, residual magnetization and saturation magnetization of the material, which can be measured by standard methods. Using the developed formula on reference data on magnetic parameters of steel 30 the possibility of control by N_i of its hardness in the whole range of its variation is shown. The field of application is non-destructive control of physical and mechanical properties of steels.

Key words: magnetic structural analysis, ferromagnetic materials, magnetic properties, anhysteretic magnetization, internal demagnetization coefficient.

Адрес для переписки: Сандомирский С. Г., ул. Академическая, 12, г. Минск 220012, Республика Беларусь
e-mail: sand_work@mail.ru

Анализ методов контроля структуры изделий показал, что тесную связь со структурными и механическими свойствами сталей имеет их внутренний коэффициент N_i размагничивания. Определение N_i проводят при измерении безгистерезисной кривой намагничивания (БКН) материала – когда одновременно с постоянным магнитным полем H на материал действуют переменным магнитным полем, которое доводит материал до насыщения [1–3]. При каждом значении H снижают амплитуду переменного поля от максимума до нуля. Измеренные после этого значения намагниченности M материала представляют в зависимости от H и получают БКН, которая имеет большую крутизну в слабых полях и не имеет точки перегиба. Ее наклон к оси M вызывают внутренние поля, возникающие из за неоднородностей материала. Тангенс угла α наклона БКН (рисунок 1) при стремлении поля H к нулю равен N_i , который позволяет достоверно судить о структурных параметрах и физико-механических свойствах материала [4, 5].

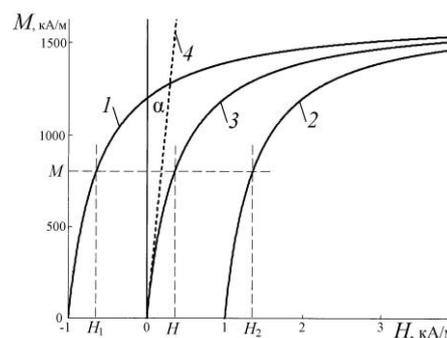


Рисунок 1 – Нисходящая (1) и восходящая (2) ветви предельной петли гистерезиса и БКН (3). Расчет по формулам (1), (2) и (3) для $H_c = 1$ кА/м, $M_r = 1200$ кА/м и $M_s = 1650$ кА/м. 4 – касательная к БКН в начале координат (расчет по формуле (5)), α – угол ее наклона к оси M

Необходимость проведения полного цикла магнитных воздействий на термически размагниченный материал и прецизионных измерений их результатов с дифференцированием полученной

зависимости $M(H)$ усложняют и снижают точность определения N_i . Между тем в [6] показано, что все изменения намагниченности на петлях гистерезиса сталей связаны с изменениями остаточной намагниченности M_r , коэрцитивной силы H_c и намагниченности M_s технического насыщения этих сталей. При этом H_c , M_r и M_s материалов можно измерить по стандартным методикам с минимальными погрешностями.

Цель доклада – установление связи N_i ферромагнитного материала с его H_c , M_r и M_s .

Для этого воспользовались [6, 7] тем, что БКН близка к линии, проходящей через средние точки горизонтальных хорд предельной петли гистерезиса [2]. Эксперименты [4] показали, что погрешность определения БКН на начальном участке при таком подходе не превышает 1–3 %. Методика [6, 7] описания БКН материала основана также на аппроксимации зависимости $M(H)$ материала на нисходящей (1) и восходящей (2) ветвях петли его гистерезиса формулами Фрелиха:

$$M = \frac{M_r M_s (H + H_c)}{M_s H_c + M_r H}, \quad (1)$$

$$M = \frac{M_r M_s (H - H_c)}{H_c (M_s - 2M_r) + M_r H}. \quad (2)$$

Это обосновано экспериментами и результатами использований формулы (1) для описания зависимости $M(H)$ материала во втором квадранте плоскости (M, H) .

Значениям намагниченности M на нисходящей и восходящей ветвях предельной петли магнитного гистерезиса соответствуют значения H_1 и H_2 напряженности намагничивающего поля (рисунок 1).

Проведенные расчеты позволили получить [6] формулу для построения БКН материала:

$$M = \frac{M_r M_s H}{H_c (M_s - M_r) + M_r H}. \quad (3)$$

Касательная к БКН (3) в начале координат описывается уравнением:

$$M = \frac{M_r M_s H}{H_c (M_s - M_r)}. \quad (4)$$

Из (4) для внутреннего коэффициента N_i размагничивания:

$$N_i = \frac{H_c (1 - M_r / M_s)}{M_r}. \quad (5)$$

Разработанная формула (5) позволяет анализировать влияние технологических режимов получения материалов на их N_i . В качестве такого примера на рисунке 2 приведены результаты анализа

изменения N_i стали 30 от ее твердости HRC по результатам измерений в [8] ее H_c , M_r и M_s .

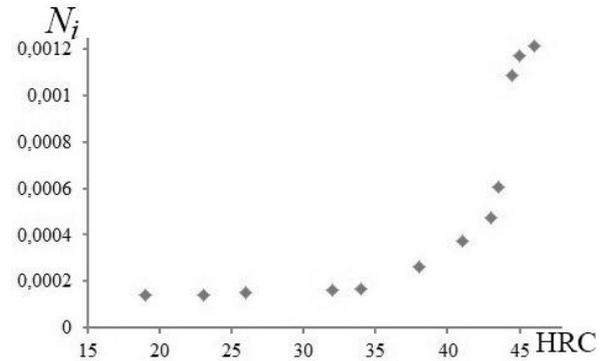


Рисунок 2 – Зависимость внутреннего коэффициента N_i размагничивания стали 30 от ее твердости HRC. Расчет N_i по формуле (5)

Полученный результат показывает монотонность зависимости $N_i(HRC)$ во всем диапазоне изменения HRC в отличие от немонотонной зависимости от HRC других магнитных параметров [8]. Он является предпосылкой для разработки метода неразрушающего контроля твердости HRC стали 30 по результату определения ее N_i .

Литература

1. Янус, Р. И. Намагничивания кривые // Физический энциклопедический словарь. – Т. 3. М.: «Сов. энциклопедия», 1963. – С. 354–355.
2. Бозорт, Р. Ферромагнетизм. – М.: Изд. иностранной литературы, 1956. – 784 с.
3. Поливанов, К. М. Ферромагнетики. Основы теории практического применения. – М.–Л.: ГЭИ, 1957. 256 с.
4. Магнитный метод определения количества остаточного аустенита в мартенситно-старееющих сталях / А. Н. Сташков [и др.] // Дефектоскопия. – 2011. – № 12. – С. 36–42.
5. Клюев В. В. Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей / В. В. Клюев, С. Г. Сандомирский. – М.: «СПЕКТР», 2017. – 248 с.
6. Сандомирский С. Г. Определение безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала по параметрам предельной петли его магнитного гистерезиса // Электротехника. – 2023. – № 10. – С. 55–60.
7. Способ построения безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала: пат. на изобретение 24370 Респ. Беларусь, МПК G01R 33/14 / С. Г. Сандомирский; заявитель: ГНУ «ОИМ НАН Беларуси». № а20230051; заявл. 15.02.2023; опубл. 05.09.2024. // Афіцыйны бюл. 2024. № 5.
8. Бида, Г. В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г. В. Бида, А. П. Ничипурук. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 218 с.

УДК 666.01

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДНЫХ СТЕКОЛ
Сергиевич О. А.¹, Колонтаева Т. В.², Богдан Е. О.¹, Станчук А. А.¹

¹УО «Белорусский государственный технологический университет»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработаны составы электродных стекол, способных работать в высокощелочных растворах при pH 12–14 и устойчивых к фторсодержащим средам. Исследованы основные физико-химические характеристики синтезированных материалов.

Ключевые слова: электродное стекло, температурный коэффициент линейного расширения, химическая стойкость, электрическое сопротивление.

SYNTHESIS AND RESEARCH OF ELECTRODE GLASSES

Sergievich O.¹, Kolontaeva T.², Bogdan E.¹, Stanchuk A.¹

¹EI "Belarusian State Technological University"

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Compositions of electrode glasses capable of working in highly alkaline solutions at pH 12–14 and resistant to fluorinated medium have been developed. The main physico-chemical characteristics of synthesized glasses are investigated.

Key words: electrode glass, linear thermal expansion coefficient, chemical resistance, electrical resistance.

Адрес для переписки: Сергиевич О. А., ул. Свердлова, 13а, г. Минск 220006, Республика Беларусь
e-mail: Topochka.83@mail.ru

Введение. Стекланные электроды относятся к ионоселективным электродам, широко используемым в различных областях науки и промышленности для контроля pH растворов электролитов. Такие электроды представляют собой стеклянный корпус из изолированного стекла с электронной мембраной сферической формы диаметром 9–10 мм. Мембрана изготавливается из специального сорта натриевого стекла, при длительном погружении которой в анализируемый раствор на ее поверхностях образуется тонкий слой гидратированного геля при обмене катионами щелочных металлов в стекле на ионы водорода с внутренним и анализируемым раствором. На двух поверхностях мембраны возникают различные потенциалы, разность которых способствует образованию потенциала стеклянного электрода [1].

Промышленное использование стеклянного электрода для работы определяется рядом факторов: составом стекла, толщиной pH-чувствительного поверхностного мембранного слоя, температурой эксплуатации и природой анализируемого раствора. Преимущественное значение для стекол такого типа имеют их электродные свойства: чувствительность, потенциал асимметрии и электрическое сопротивление [2].

При увеличении pH для исследования щелочных растворов стеклянные электроды начинают терять свою водородную функцию, приобретая способность изменять свой потенциал. На основании теоретических и экспериментальных данных, а также систематическим исследованием электродных свойств стекол от их состава были резко увеличены области использования стеклянных электродов.

Как показал анализ литературных данных [3], эффективное влияние на повышение химической

стойкости силикатных стекол оказывает введение ZrO_2 в количестве не более 2 мол. %. Наблюдается повышение химической стойкости стекол при добавлении оксидов щелочноземельных металлов, а также P_2O_5 или LiF. Установлено влияние оксида BaO на расширение области водородной функции синтезированных стекол в щелочной среде. Положительное влияние на щелочестойкость стекол оказывает введение в их состав TiO_2 .

Таким образом, основной целью данного исследования является разработка составов электродных стекол, способных работать в высокощелочных средах и быть устойчивыми к фторсодержащим средам, которые могут использоваться в качестве электровакуумных стекол в стеклянных электродах.

Методика синтеза. Опытные образцы синтезировались при сплавлении предварительно подготовленных и сшихтованных сырьевых материалов, в качестве которых использовали кварцевый песок, мел, соду кальцинированную, глинозем, борную кислоту, поташ и магнезит, предварительно просеянные через сито № 01. Отдозированные компоненты шихты перемешивались до достижения полной однородности в течение 10–15 мин. Стекломассу сплавляли в корундовых тиглях в электрической печи при температуре 1350 ± 10 °С. Максимальная температура варки с выдержкой в течение 2 часов составила 1300 °С. Далее тигли вынимались из печи при достижении однородности стекло­массы. Вырабатывались опытные образцы в специальные формы. После отливки осуществлялся отжиг образцов в муфельной печи при температуре 550 °С. На выработанных и отожженных образцах и тиглях визуально оценивались варочные свойства: наличие непровара, кремне-

земистой корки, кристаллических включений, свилей, количество, размер и распределение пузырей.

Экспериментальная часть. Синтез стекол осуществляли на основе системы $\text{Li}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{BaO}-\text{La}_2\text{O}_3-\text{ZrO}_2-\text{SiO}_2$ при дополнительном введении LiF вместо Li_2O и P_2O_5 вместо SiO_2 . Установлено, что стекломасса хорошо проваривается при 1300 °С, однако при добавлении LiF проявляется склонность к глушению.

Стекломатериалы, полученные при добавлении до 7 мол. % P_2O_5 , соответствуют требованиям, предъявляемым к стеклам, устойчивым во фторсодержащих средах: термический коэффициент линейного расширения – $(102,8-110) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$, удельное электрическое сопротивление при 25 °С – менее $1 \cdot 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, потери массы при выдержке в 0,1 % растворе HF в течении 7 суток – 1,45–2,40 %, в течении 28 суток – 1,55–2,56 %.

Стекломатериалы с добавкой до 4 мол. % LiF характеризуются объемной кристаллизацией при температурах 600–850 °С, фактически без промежуточного проявления опалесценции, что отрицательно сказывается на эксплуатационных характеристиках изделий. При повышении содержания LiF в составах шихт ТКЛР опытных образцов увеличивается от $102 \cdot 10^{-7}$ до $108 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$. Химическая стойкость исследуемых стекол к фторсодержащим средам, определенная по потерям массы при выдержке в 0,1 % растворе HF в течение 7 суток, составляет 1,5–2,25 %, а в течение 28 суток – 1,62–2,33, что соответствует требованиям, предъявляемым к кислотостойким стеклам. Однако требуется корректировка составов с целью снижения кристаллизационной способности исследуемых стекол.

Для повышения химической стойкости стекол необходимо совместное введение добавок LiF и P_2O_5 в состав электродных стекол исследуемой системы. Установлено, что по значениям ТКЛР опытные стекла совместимы со значениями ТКЛР корпусных стекол стеклянных электродов. Значения удельного электрического сопротивления при 25 °С соответствуют требованиям, предъявляемым к электродным стеклам (не выше $1 \cdot 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Химическая стойкость опытных стекол определялась при их выдержке в 0,1 % растворе HF в течение 1, 3, 7, 14, 21 и 28 суток. Установлено, что потери массы не превышают 2,5 %, а водородный показатель раствора незначительно изменяется в интервале от 2,2 до 2,4. Причем наиболее существенное влияние на повышение химической стойкости к фторсодержащим средам оказывает введение P_2O_5 в количестве 5 мол. %.

Таким образом, по комплексу усредненных показателей физико-химических свойств, приве-

денных в таблице 1, в качестве оптимального выбран опытный образец следующего состава, мол. %: $\text{SiO}_2 - 55,0$; $\text{La}_2\text{O}_3 - 4,0$; $\text{ZrO}_2 - 2,0$; $\text{BaO} - 4,0$; $\text{Li}_2\text{O} - 27,0$; $\text{P}_2\text{O}_5 - 5$.

Таблица 1 – Физико-химические свойства опытных образцов оптимального состава

Показатели свойств	Усредненное значение
Температура варки, °С	1300
Температура начала кристаллизации, °С	720
Температура начала размягчения, °С	490
Температурный коэффициент линейного расширения, $10^{-7}, \text{ K}^{-1}$	106,8
Электрическое сопротивление, $10^7, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	7,0
Устойчивость к фторсодержащим средам (потери массы), %	
Выдержка 7 сут	1,66
Выдержка 28 сут	1,73

Методом рентгенофазового анализа исследован фазовый состав синтезированных стеклообразов оптимального состава. Выявлено, что одной из выделяющихся фаз является $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. В связи с тем, что оксид алюминия не вводился в состав стекол, предполагается, что в процессе синтеза происходит взаимодействие стекломассы с материалом корундизового тигля. Для предотвращения формирования данной фазы электродное стекло следует варить в платиновых тиглях.

Таким образом, разработан состав стекла, которое может использоваться в качестве электродного стекла для рабочей части стеклянного электрода, устойчивого к фторсодержащим средам, со следующими физико-химическими свойствами: ТКЛР – $106,8 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$, удельное электросопротивление при 25 °С – $7 \cdot 10^7 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, потеря массы при выдержке в 0,1 % растворе HF 7 суток – 1,66 %.

Литература

1. Шульц, М.М. Стеклянный электрод. Теория и применение / М. М. Шульц. – Соросовский образовательный журнал. – 1998. – Т. 8, № 1. – С. 33–39.
2. Карпухина, Н. Г. Электродные свойства некоторых фторсодержащих щелочно-силикатных стекол / Н. Г. Карпухина, А. А. Киприанов // Физика и химия стекла. – 2001. – Т. 27, № 1. – С. 101–107.
3. Киприанов, А. А. Влияние фторидных добавок на электрические характеристики щелочно-силикатных электродных стекол / А. А. Киприанов, Н. Г. Карпухина // Физика и химия стекла. – 2001. – Т. 27, № 1. – С. 108–115.

УДК 534.131:534-8

ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ СОСТАВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, СОДЕРЖАЩИХ КОЛЬЦЕВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Степаненко Д. А., Киндрук А. Н.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрена методика механико-математического моделирования вынужденных колебаний составных ультразвуковых колебательных систем, включающих последовательно соединенные антирезонансные стержневой и кольцевой элементы. Получено выражение для общего коэффициента передачи колебаний по амплитуде. Приводятся численный пример применения разработанной методики и подтверждение достоверности полученных результатов на основе моделирования с помощью метода конечных элементов. Рассмотрена возможность дополнительного повышения коэффициента передачи колебаний путем изменения параметров стержневого элемента колебательной системы.

Ключевые слова: вынужденные колебания, ультразвуковая колебательная система, кольцевой концентратор.

FORCED VIBRATIONS OF COMPOUND ULTRASONIC VIBRATORY SYSTEMS COMPRISING RING-SHAPED ELEMENTS

Stepanenko D., Kindruk A.

Belarusian national technical university

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article presents methodology for mechanical-mathematical modelling of forced vibrations of compound ultrasonic vibratory systems consisting of serially connected antiresonant bar and ring elements. Expression for total coefficient of vibration transmission by amplitude is derived. Numerical example of application of the suggested methodology and verification of the obtained results by means of finite element modelling are given. Possibility of additional improvement of transmission coefficient by adjusting parameters of the bar element of vibratory system is considered.

Key words: forced vibration, ultrasonic vibratory system, ring-shaped concentrator.

Адрес для переписки: Степаненко Д. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: dstepanenko@bntu.by

Эффект усиления ультразвуковых колебаний по амплитуде кольцевыми упругими элементами ранее описывался авторами для неравнотолщинных колец [1], однако усилительными свойствами обладают и равнотолщинные кольцевые элементы при их работе в режиме вынужденных колебаний на частоте возбуждения, близкой к одной из собственных частот колебаний. Подобный эффект наблюдался при моделировании ультразвуковой колебательной системы (УЗКС) для кавитационного упрочнения деталей машин [2], однако не был подробно описан и исследован. Целью данного исследования являлась разработка механико-математических моделей, описывающих усилительные свойства равнотолщинных кольцевых упругих элементов и составных УЗКС на их основе.

Вынужденные изгибные колебания кольца рассматриваются в приближении Эйлера-Бернулли, основанном на допущении о нерастяжимости средней линии и не учитывающем сдвиговые деформации. Зависимость $v(\varphi)$ амплитуды тангенциальных колебательных смещений от угловой координаты φ ищется в виде разложения по ортогональным базисным функциям $v_i(\varphi) = \sin(i\varphi)$, являющимся решениями однородного дифференциального уравнения, описывающего свободные колебания кольца, и соответствующим собственным формам колебаний:

$$v(\varphi) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i v_i(\varphi). \quad (1)$$

Для коэффициентов a_i ряда (1) было получено следующее выражение:

$$a_i = \frac{iF_0}{4(i^2+1)\pi^3 R \rho S (f_i^2 - f^2)},$$

где F_0 – амплитуда вынуждающей силы, R – радиус средней линии кольца, ρ – плотность материала, S – площадь поперечного сечения, f – частота вынужденных колебаний, f_i – i -я собственная частота колебаний.

Коэффициент передачи колебаний по амплитуде определяется формулой

$$K_{\text{ring}}(\omega) = \left| \frac{w(\pi)}{w(0)} \right| = \left| \frac{\sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-1)^{i^2}}{(i^2+1)\omega^2 - i^2(i^2-1)^2\beta}}{i^2} \right|,$$

где $w(\varphi) = dv/d\varphi$ – амплитуда радиальных колебательных смещений; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота колебаний; $\beta = EI/\rho SR^4$ – коэффициент, учитывающий геометрические параметры и свойства материала; E – модуль упругости; I – осевой момент инерции поперечного сечения.

Максимальные значения коэффициента передачи $K \rightarrow \infty$ наблюдаются на частотах антирезонанса, соответствующих нулевому значению входной амплитуды $w(0)$, а его минимальные зна-

чения $K = 1$ – на частотах резонанса, для которых колебания имеют одноименный характер.

Для составной УЗКС, состоящей из последовательно соединенных стержневого волновода с постоянной площадью поперечного сечения и равнотолщинного кольца, общий коэффициент передачи будет определяться формулой

$$K_{\text{общ}}(\omega) = K_{\text{бар}}(\omega)K_{\text{ring}}(\omega),$$

где $K_{\text{бар}}(\omega) = |\cos(\omega L/c)|$ – коэффициент передачи для стержневого волновода, L – длина волновода, c – скорость продольной стержневой волны.

Максимальное значение общего коэффициента передачи будет достигаться при близости частот антирезонанса составных элементов УЗКС. Частота антирезонанса стержневого элемента УЗКС определяется при этом из формулы

$$f = (2n - 1)c/4L, \quad (2)$$

где n – натуральное число.

В практических расчетах вначале определяются частоты антирезонанса кольцевого элемента УЗКС, а затем для одной из этих частот по формуле (2) рассчитывается длина стержневого элемента.

В качестве численного примера было рассмотрено проектирование УЗКС при следующих параметрах кольцевого элемента: плотность материала $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ модуль упругости $E = 210 \text{ ГПа}$, размеры поперечного сечения $b \times h = 2 \times 2 \text{ мм}$, радиус средней линии $R = 20 \text{ мм}$. Для частоты антирезонанса кольцевого элемента, равной 24523 Гц, расчетная антирезонансная длина стержневого элемента, имеющего те же свойства материала и те же размеры сечения, что и кольцевой элемент, составила 52,9 мм. Расчет общего коэффициента передачи в случае точного совпадения частот антирезонанса требует особого рассмотрения, так как в этом случае в выражении для коэффициента возникают неопределенности вида 0/0, требующие раскрытия по правилу Лопиталя. В связи с этим был рассмотрен более простой с точки зрения расчета случай, когда между частотами антирезонанса имеется рассогласование. При укорочении стержневого элемента до длины 47,5 мм, что соответствует повышению его частоты антирезонанса на 11,4 %, резонансная частота УЗКС имела значение 24721 Гц, близкое к частоте антирезонанса кольцевого элемента.

Общий коэффициент передачи составил в этом случае $K_{\text{общ}} = 2,138$.

Для подтверждения достоверности полученных численных результатов было проведено моделирование колебаний составной УЗКС с помощью метода конечных элементов с применением программы Comsol Multiphysics. Расчетное распределение амплитуды колебаний представлено на рисунке 1.

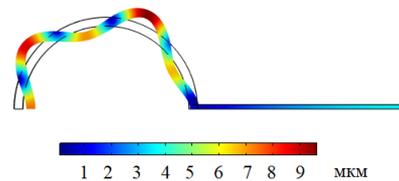


Рисунок 1 – Расчетное распределение амплитуды колебаний составной УЗКС

Расчетные значения резонансной частоты и коэффициента передачи составили, соответственно, 23932 Гц и 1,999, что согласуется со значениями, полученными на основе механико-математической модели. Более точные результаты могут быть получены при описании колебаний с помощью теории Тимошенко.

Коэффициент передачи колебаний может быть дополнительно повышен за счет увеличения площади поперечного сечения стержневого элемента УЗКС или волнового сопротивления ρc его материала, так как рассматриваемая УЗКС имеет аналогию со ступенчатыми стержневыми концентраторами, состоящими из двух антирезонансных стержней (четвертьволновых сегментов), различающихся площадью поперечного сечения и/или свойствами материала, для которых коэффициент передачи определяется формулой

$$K = (\rho c S)_{\text{вх}} / (\rho c S)_{\text{вых}},$$

где индексы указывают на отношение соответствующих параметров к входному и выходному сегментам концентратора.

Литература

1. Степаненко, Д. А. Вариационная задача о колебаниях неравнотолщинных колец и ее применение для расчета концентраторов ультразвуковых колебаний / Д. А. Степаненко, А. Н. Киндрук // Наука и техника. – 2024. – № 4. – С. 295–303.
2. Experimental investigation of peening cylindrical workpieces utilizing a transducer with ring sonotrode / F. Bai [et al.] // Applied Sciences. – 2021. – V. 11, Art. 94.

УДК 621.319.2

УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Сычик В. А., Глухманчук В. В., Уласюк М. М.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Синтезировано устройство контроля ионизирующих излучений на базе полупроводниковой структуры, содержащей полупроводниковое основание, соединенные каналом области стока и истока, на которой размещен слой широкозонного высокоомного полупроводника обратной проводимости. Затвор триединой структуры выполнен p - n гетеропереходом. Устройство обладает высокой чувствительностью к ионизирующим излучениям и низким значением питающего напряжения.

Ключевые слова: измерительный преобразователь, ионизирующее излучение, полевая триодная структура, широкозонный полупроводник, омические контакты.

IONIZING RADIATION CONTROL DEVICE

Sychyk V., Gluhmanchuk V., Ulasiuk M.

Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A device for monitoring ionizing radiation has been synthesized based on a semiconductor structure containing a semiconductor base, drain and source regions connected by a channel, on which a layer of wide-band high-resistance semiconductor with reverse conductivity is placed. The gate of the triune structure is made by a p - n heterojunction. The device has high sensitivity to ionizing radiation and a low value of supply voltage.

Key words: measuring transducer, ionizing radiation, field triode structure, wide-gap semiconductor, ohmic contacts.

Адрес для переписки: Сычик В. А., пр. Рокоссовского, 49–18, г. Минск 220095, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by

Устройство относится к полупроводниковым детекторам и может быть использовано для измерений характеристик ионизирующих излучений. Цель разработки – повышение чувствительности и улучшение эксплуатационных характеристик. Полупроводниковый преобразователь состоит из полевой триодной системы, содержащий полупроводниковое основание, области истока и стока, соединенных каналом n -типа проводимости, на которой размещен слой высокоомного широкозонного полупроводника обратного типа проводимости. На слое полупроводника сформирована сильнолегированная область p^+ -типа с нанесенными омическими контактами. Затвор триодной структуры выполнен p - n переходом. Преобразователь также содержит защитный слой, выполненный из аморфного диэлектрика триодной структуры. Чувствительность преобразователя $2,8 \cdot 10^{-6}$ р/с, питающее напряжение – 5 В.

Устройство относится к приборам для физических измерений, в частности к полупроводниковым детекторам ионизирующих излучений, и может быть использовано для измерения параметров потоков ионизационных излучений.

На рисунке 1 изображена конструкция преобразователя.

Для оценки интенсивности ионизирующих излучений используются устройства контроля с твердотельными преобразователями ионизирующих излучений [1, 2].

Нами создано устройство контроля ионизирующих излучений, в котором для преобразования ионизирующих излучений используется гетеропереходная полевая триодная структура.

Структура полупроводникового светочувствительного элемента (ПСДЭ) изображена на рисунке 1.

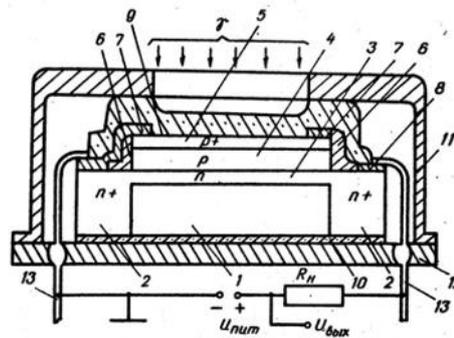


Рисунок 1 – Конструкция преобразователя

Конструктивно устройство контроля ионизирующих излучений состоит из полевой триодной структуры, содержащей полупроводниковое основание 1, например, p -типа, области истока и стока 2, соединенные каналом 3 n -типа проводимости, на котором размещен слой высокоомного широкозонного полупроводника 4 обратного типа проводимости, например, p -типа, причем канал 3 и слой полупроводника образуют гетеропереход. На слое полупроводника 4 p -типа сформирована сильнолегированная область 5 p^+ -типа из того же материала. На торцах p -слоя размещены защитные слои диэлектриков 6. На область p^+ -типа нанесен омический контакт 7 в виде слоя металла. Полупроводник 4 с областью 5 и омическим контактом 7 представляют затвор к полевой триодной структуре, причем слой металла является одновременно

омическим контактом к истоку полевой триодной структуры. Устройство контроля ионизирующих излучений также содержит омический контакт 8 из слоя металла к стоку, защитный слой 9 полупроводниковой триодной структуры, слой диэлектрика 10 на основании 1, защитный металлический корпус 11, в основании 12 которого размещены внешние омические выводы 13 от истока и стока 2 триодной структуры.

Полупроводниковая полевая триодная структура, представляющая чувствительной полупроводниковый элемент преобразователя, выполнена из полупроводника, обладающего высокой подвижностью и временем жизни носителей, т. е. высокой их диффузионной длиной L_d , например, из германия с шириной запрещенной зоны $E_g = 0,66$ эВ. Полупроводниковое основание. Концентрация примеси в областях истока и стока составляет 10^{10} – 10^{21} см⁻³, в области канала 10^{16} – 10^{18} см⁻³. Толщина встроенного канала аналогична толщине триодной МДП-структура и составляет 1–10 мкм.

Для получения высокой чувствительности необходимо, чтобы в область канала 3 инжектировали генерированные в p -слое полупроводника 4 воздействующими частицами высоких энергий электроны. Поэтому p -слой выполнен из широкозонного высокоомного полупроводника, например GaAs, обладающий идентичными с материалами основания 1 постоянной решетки и температурным коэффициентом линейного расширения. Он образует с каналом 3 n -типа гетеропереход, который обладает преимущественной инжекцией через переход в канал неравновесных носителей – электронов. Высокая подвижность носителей и время их жизни обеспечивает эффективное накопление носителей в слое высокоомного широкозонного p -полупроводника 4 и их диффузию к p - n переходу с высоким коэффициентом переноса. Для полного поглощения ионизирующих излучений (γ -квантов) толщина слоя p -полупроводника 4 составляет, 15–50 мкм и определяется интенсивностью и энергией ионизирующих излучений. Концентрация основных носителей p -полупроводника 4 составляет 10^{14} – 10^{15} см⁻³.

Методом диффузии либо ионной имплантации на высокоомном полупроводнике 4 сформирована сильнолегированная область 5 p^+ -типа из того же материала GaAs, обладающая малым удельным сопротивлением 3–6 Ом·см (концентрация акцепторной примеси (Zn, Cd) составляет 10^{18} – 10^{20} см⁻³), толщина области 5 составляет 0,5–2 мкм. Область 5 p^+ -типа обладает малым переходным сопротивлением со сформированным на ней в виде металлической полосы по периметру омическим контактом 7 толщиной 1–3 мкм. В результате потенциал по всей поверхности p^+ -области 5 распределен равномерно. Омический контакт 7 к области 5 p^+ одновременно

нанесен на область истока и стока 2, являясь ее омическим контактом, т. е. исток соединен с затвором электрически. К области истока и стока 2 сформирован омический контакт 8. Омический контакт 7 истока и омический контакт 8 стока отделены от высокоомного полупроводника 4 слоями диэлектрика 6, толщина которого составляет 1–3 мкм. Площадь, занимаемая омическим контактом 7 затвора, составляет 1–3 % площади p^+ -области 5.

На затворе триодной структуры, т.е. области 5 p^+ -типа с омическим контактом сформирован защитный слой 9, который выполнен из аморфного диэлектрика, например GeO, SiO, и защищает триодную структуру от тяжелых частиц, при этом обладая хорошим пропусканием для γ -квантов и рентгеновских лучей. Толщина защитного слоя 9, зависит от энергии, типа и плотности потока тяжелых частиц и составляет 0,8–25 мкм. Снизу на полупроводниковом основании 1 размещен слой диэлектрика 10, позволяющий жестко устанавливать полупроводниковую триодную структуру на основание 12 защитного металлического корпуса 11. Слой диэлектрика изготавливается из материала, обладающего высокими изоляционными свойствами, например, SiO₂, толщиной 10–50 мкм. Омические контакты 7 истока и 8 стока электрически соединены (путем сварки или пайки) проводниками с внешними омическими выводами 13 устройства. Корпус 11 герметично экранирует полупроводниковую триодную структуру от внешних воздействий (влаги, электрических помех). Контролируемые ионизационные излучения воздействуют на полупроводниковую триодную структуру через проем (окошко) в корпусе.

При воздействии частиц высокой энергии (α , β -частиц) либо γ -квантов и рентгеновских лучей через проем в корпусе 11 на рабочую поверхность устройства контроля ионизирующих излучений поток Φ_0 ионизирующего излучения проникает через защитный слой 9, где наиболее сильно ослабляется энергия α -и-частиц, и достигает область p^+ -типа затвора полупроводниковой полевой триодной структуры. В высокоомном широкозонном полупроводнике 4 с низкой концентрацией носителей (Pr, Pp) появляется избыточная концентрация электронов $n^{(+)}$ от действия потока ионизирующих излучений, обусловленная как непосредственной ионизацией частицами высоких энергий, так и вторичной ионизацией возникающих высокоэнергетических электронов. Результирующая концентрация электронов $n^{(+)}$ в полупроводнике 4 определяется из зависимости

$$n^{(+)} = \Phi \Delta E / E_a + n_{dr} [1 - \exp(-(E - E_1) / r E_R)] = n_{dr} + n_{df}, \quad (1)$$

где n_{dr} – концентрация избыточных электронов, обусловленная действием на полевую структуру ионизирующих излучений; n_{df} – концентрация

избыточных электронов, обусловленная вторичной электронной ионизацией; ΔE – кинетическая энергия частиц ионизирующего излучения; E_o – средняя энергия ионизации в полупроводнике; E – энергия вторичного электрона; E_i – минимальная пороговая энергия ионизации, отсчитываемая от края валентной зоны; r – число генерируемых фононов за один акт ионизации; E_R – энергия фононов.

Генерируемые в области p - n гетероперехода и в слое толщиной $d = Ln$, где Ln – диффузионная длина электронов, электронно-дырочные пары эффективно разделяются p - n переходом и в область канала поступает поток электронов с концентрацией n_{dr} . Вследствие наличия эффекта вторичной ионизации возникает градиент концентрации избыточных-электронов в полупроводнике 4, что обуславливает дополнительный диффузионный поток электронов в область канала. Диффузионный поток дырок в область канала ограничивается энергетическим барьером валентной зоны в области p - n перехода. Результирующий поток электронов $N(t)$ в область канала 3 полупроводниковой полевой триодной структуры запишется в виде выражения

$$N(t) = S [n_{dr}(w_o + Ln) + Dndndf/dx], \quad (2)$$

где W_o – толщина канала; S – площадь канала 3; q – величина заряда электрона; Dn – коэффициент диффузии и время жизни электронов; $dndf/dx$ – градиент концентрации электронов в полупроводнике 4. Изменение выходного тока триодной полевой структуры составит

$$\Delta I_c = \Delta I_{dr} + \Delta I_{dif}, \quad (3)$$

где ΔI_{dr} и ΔI_{dif} – составляющие выходного тока от ионизирующего излучателя и от вторичной электронной изоляции соответственно.

Как следует из выражения (3) выходной ток резко возрастает с повышением интенсивности

потока и энергии заряженных частиц, при этом полевая триодная структура устройства ионизирующих излучений' работает в обогащенном режиме. При подключении к электродам устройства прямо-полярного питающего напряжения, величина которого $U_a = 3-10$ В. в нагрузочном элементе РН выделяется напряжение сигнала $U_{вых}$. пропорциональное величине выходного тока I_c и его изменению, обусловленному действием ионизационных излучений: $U_{вых} = I_c R_{PH}$.

Экспериментальный образец устройства контроля ионизирующих излучений обладает следующими параметрами: чувствительность $\varphi = 2,8 \cdot 10^{-6}$ Р, рабочий диапазон контролируемых доз излучений $10^{-6}-10^{-3}$ Р, питающее напряжение $U_a = 5$ В.

Таким образом, благодаря тому, что в предложенном полупроводниковом преобразователе ионизирующих излучений чувствительный полупроводниковый элемент выполнен полевой триодной структурой со встроенным каналом, защитный слой чувствительного элемента выполнен из аморфного диэлектрика, а полупроводниковая область затвора сформирована p - p -структурой из широкозонного высокоомного полупроводника, причем канал n -типа и p -область затвора представляет гетеропереход, более чем в 5 раз возрастает чувствительность с $2,5 \cdot 10^{-5}$ р/с до $2,8 \cdot 10^{-6}$ Р/с и более, в 10 раз снижается питающее напряжение со 100 В до 5 В.

Литература

1. Сычик, В. А. Измерительные преобразователи излучений на основе полупроводниковых приборных структур. Мн.: Выш. школа, 1991, 180 с.
2. Сычик, В. А. Твердотельные преобразователи ионизирующих излучений на основе полупроводниковых структур / В. А. Сычик, Н. Н. Уласюк // Проблемы создания информационных технологий. – Вып. 13. – Мн., 2006. – С. 113–119.

УДК 681.3

ЭЛЕКТРЕТНЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ Сычик В. А., Уласюк Н. Н.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработан электретный источник электроэнергии, состоящий из закрепленного на валу металлического дискового ротора, на торцевой поверхности которого попарно размещены электреты с разноименными зарядами. Внешняя цепь содержит трансформатор с первичными обмотками. ЭДС электретного источника электроэнергии равна сумме ЭДС последовательно включенных секций трансформатора.

Ключевые слова: источник электроэнергии, электрет, напряженность электрического поля, дисковый ротор, электрический трансформатор.

ELECTRICAL ENERGY SOURCE Sychyk V., Ulasiuk M.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. An electret power source has been developed, consisting of a metal disk rotor fixed on a shaft, on the end surface of which electrets with opposite charges are placed in pairs. The external circuit contains a transformer with primary windings. The EMF of the electret power source is equal to the sum of the EMF of the transformer sections connected in series.

Key words: source of electricity, electret, electric field strength, disk rotor, electric transformer.

Адрес для переписки: Сычик В. А., пр. Рокоссовского, 49–18, г. Минск 220095, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by

В возобновляемых источниках электроэнергии эффективно используются устройства, осуществляющие преобразование потоков фотонов различной энергии и длины волны в электроэнергию. Также находят применение источники электроэнергии, преобразующие постоянное электрическое поле в напряжение переменного тока [1, 2].

Нами разработан электретный источник электроэнергии, который может использоваться при производстве генераторов автономного электропитания для космических устройств и в микроэлектронике.

Устройство относится к области электротехники, касается устройств электропитания и может найти применение при производстве источников автономного питания в микроэлектронике. Цель – повышение генерируемого напряжения. На металлическом дисковом роторе установлены попарно электреты с разноименными зарядами. Площади их равны. На статоре размещены электроды, форма и размеры которых идентичны электретам. Электроды статора попарно подключены к изолированным друг от друга первичным обмоткам выходного трансформатора. При вращении ротора с электретами на электродах статора индуцируется переменная ЭДС. Магнитные потоки первичных обмоток в магнитопроводе трансформатора складываются, за счет чего на общей вторичной обмотке ЭДС увеличивается пропорционально числу пар разноименных электретов.

На рисунке 1 – приведен генератор со схемой внешней цепи, общий вид – структура электретного источника электроэнергии.

Электронный электрогенератор состоит из входящего в систему генерирования металлического дискового ротора 1, закрепленного на валу

2, на торцевой поверхности которого попарно размещены электреты 3 с разноименными зарядами, и диэлектрического статора 4, на котором укреплены электроды 5. Внешняя цепь содержит трансформатор 6 с несколькими первичными обмотками (их число равно числу пар электретов) и одной вторичной обмоткой.

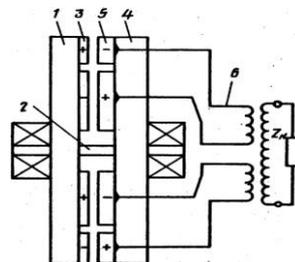


Рисунок 1 – Структура электретного источника электроэнергии

Электреты 3 выполнены в форме сегментов, заключенных между двумя радиусами, проведенными из центра ротора, и двумя окружностями с центром, совпадающим с центром ротора. Ширина, каждого сегмента по дуге окружности равна ширине свободной части ротора между двумя сегментными электретами.

Площади сегментов пар равны между собой. Для получения синусоидального напряжения число пар разнополярных электретов составляет четное число. Диск ротора посредством вала соединен с приводным двигателем и заземлен. Заземление исключает искажение формы кривой напряжения.

Дисковый статор 4 выполнен из неполярного диэлектрика с высокими изоляционными свойствами, например фторопласта. Металлические

электроды статора по форме и размерам аналогичны форме и размерам электретов ротора. Электроды также попарно соединены с соответствующей обмоткой трансформатора b являющейся секцией первичной обмотки. Каждая секция электрически изолирована от остальных, причем все Секции намотаны согласно. Число секций равно числу пар электретов.

При включении двигателя дисковый ротор l с электретами 3 приходит во вращение. Под действием поля электретов на каждом из электродов 5 статора индуцируется заряд соответствующего знака, изменяющийся по периодическому закону от нуля, когда электрод располагается над металлическим сектором ротора, до максимума - при совпадении положения электретов и электродов. В результате этого через каждую изолированную секцию первичной обмотки трансформатора b , с которой соединена соответствующая пара электродов, протекает переменный ток, вызывающий изменение магнитного потока в сердечнике трансформатора b . Так как все секции включены согласно, то потоки отдельных секций в сердечнике складываются. В результате ЭДС вторичной обмотки трансформатора E_2 определяется результирующим действием ЭДС всех изолированных и согласно включенных секций - E_c , т. е. $E = NE$,

где N - число пар электродов, соответствующих числу пар разнополярных электретов.

В экспериментальном образце устройства диаметром ротора и статора 200 мм с восемью парами сегментных электретов из полиметилметакрилата, площадью 7 см^2 и толщиной 1 мм каждый, расстоянии между электретами и электродами 0,1 мм и при циклической частоте вращения двигателя 50 Гц получена ЭДС в секции первичной обмотки (индуктивность 50 мГн) 8,6 В. При коэффициенте трансформации $n = NW_c/W_2 = 1$, где W_c - число витков в секции; W_2 - число витков вторичной обмотки, на вторичной обмотке получено напряжение 70 В.

По сравнению с известным электронным источником аналогичных размеров разработанный нами источник электроэнергии более чем в два раза повышает величину генерируемого переменного напряжения.

Литература

1. Губкин, А. Н. Электреты. М.: Наука, 1998. - 164 с.
2. Электретные источники электроэнергии / В. А. Сычик [и др.] // Материалы МНТК «Демографические проблемы Беларуси», ч. 3. Мн., 1999. - С. 54.

УДК 681.3

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ВЛАЖНОСТИ

Сычик В. А., Уласюк Н. Н.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Разработан электронный источник электроэнергии, состоящий из закрепленного на валу металлического дискового ротора, на торцевой поверхности которого попарно размещены электреты с разноименными зарядами. Внешняя цепь содержит трансформатор с первичными обмотками. ЭДС электретного источника электроэнергии равна сумме ЭДС последовательно включенных секций трансформатора.

Ключевые слова: измерительный преобразователь влажности, влажная среда, гигросчувствительный слой, гетероструктура, омический контакт.

HUMIDITY MEASURING TRANSDUCER

Sychyk V., Ulasiuk M.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. An electronic source of electric power has been developed, consisting of a metal disk rotor fixed on a shaft, on the end surface of which electrets with opposite charges are placed in pairs. The external circuit contains a transformer with primary windings. The EMF of the electret source of electric power is equal to the sum of the EMF of the transformer sections connected in series.

Key words: humidity measuring transducer, humid environment, hygrosensitive layer, heterostructure, ohmic contact.

Адрес для переписки: Сычик В. А., пр. Рокоссовского, 49-18, г. Минск 220095, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by

Устройство относится к контрольно-измерительной технике и может быть использовано в системах контроля и автоматического регулирования степени влажности парогазовых сред и процессов сушки.

Известны емкостные датчики влагомеров, представляющие собой воздушные конденса-

торы, снабженные вспомогательными устройствами для введения образца, уплотнения его, освобождения конденсатора и т. д. [1]. Эти датчики характеризуются сложностью конструкции; значительной зависимостью точности измерения от жесткости конструкции, расположения электродов между собой, геометрических размеров

активных элементов датчика; большими габаритами и значительным расходом материала на их изготовление.

Известно также полупроводниковое устройство для измерения влажности, содержащее полупроводниковый материал, полупроводник, с осажденным на него слоем окиси олова, и металлические электроды, находящиеся в контакте с материалом и слоем олова [2].

Влажность окружающей среды этим устройством определяется как функция обратного тока полупроводникового соединения.

Полупроводниковое устройство имеет невысокую чувствительность, низкую воспроизводимость параметров, значительную инерционность.

Ближайшим техническим решением является емкостной датчик влажности [3]. Такой датчик содержит нижний электрод, гигроскопический слой диэлектрика, выполненный в виде пористой пленки, верхний электрод, выполненный в виде сплошной пленки, и токоввода. Однако этот датчик влажности имеет невысокую чувствительность вследствие того, что гигроскопический слой представляет обычную структуру, окись алюминия и приращение емкости зависит только от процентного содержания влаги, а его значительная инерционность обусловлена тем, что для получения надежного омического контакта с токовводом, а также уменьшения тангенса угла диэлектрических потерь, толщина верхнего электрода значительная (не менее 2 мкм).

Цель разработки – повышение чувствительности и снижение инерционности датчика влажности.

Достигается это тем, что гигроскопический слой выполнен в виде гетероструктуры, состоящей из двух слоев различных по электрофизическим свойствам широкозонных высокоомных полупроводников, верхний из которых представляет послонную структуру с плотной и пористой областями, толщины которых взяты в соотношении 2:1, при этом толщина нижнего слоя и плотной области верхнего слоя равна соответствующей толщине области объемного заряда в каждом полупроводнике, причем верхний электрод имеет ячеистую структуру, а отношение минимальной толщины слоя верхнего электрода к его максимальной толщине составляет 1:4* а отношение площадей тонкой и толстой его частей равно 5:1.

На чертеже изображен датчик влажности.

Основным функциональным узлом приборов контроля влажности является измерительный преобразователь влажности в электрический сигнал. Известны преобразователи влажности, содержащие в качестве чувствительных элементов воздушные конденсаторы и гигроскопические слои диэлектрика (Al_2O_3) [1, 2].

Нами создан измерительный преобразователь влажности, в котором гигроскопический слой выполнен из полупроводниковой гетероструктуры.

Он состоит из подложки, выполняющей функции нижнего электрода и нижнего токоввода, гигроскопического слоя, представляющего собой гетероструктуру, состоящую из двух полупроводниковых слоев, нижнего слоя и верхнего слоя, имеющего плотную область и пористую область, верхнего электрода и верхнего токоввода.

В схеме влагомера преобразователь влажности выполняет роль нелинейной емкости, функционально зависящей от влагосодержания датчика. Полная емкость датчика влажности будет состоять из статической емкости плоского конденсатора, представляющего металлические электроды и слой диэлектрика – гигроскопический слой 1, 2, 3, и динамической емкости гетероструктуры, создаваемой на границе нижнего слоя и плотной области верхнего слоя гетероструктуры, которая пропорциональна концентрации ионизированных дефектов, т. е.

$$C_b \sim (N_1 \cdot N_2 / (U - U_k))^{1/2} \quad (2)$$

где N_1 , N_2 – концентрация ионизированных дефектов (примесей) соответственно в слое 1 и слое 2; U – напряжение смещения; U_k – контактная разность потенциалов.

При заданных значениях электрофизических параметров полупроводниковых слоев гетероструктуры максимальное изменение динамической емкости гетероструктуры от ее влагосодержания, наблюдается в случае, когда толщина нижнего слоя 1 гетероструктуры к плотной области 2 верхнего слоя равна соответствующей толщине области объемного заряда в каждом полупроводнике. При помещении преобразователя влажности в парогазовую среду происходит миграция паров влаги через верхний электрод вглубь гигроскопического слоя. Статическая емкость преобразователя влажности будет равна

$$C = S / (V_1 / \Sigma_1 + V_2 / \Sigma_2 + V_3 / \Sigma_3), \quad (2)$$

где S – эффективная площадь верхнего электрода 5; Σ_1 , Σ_2 , Σ_3 – диэлектрическая проницаемость слоев 1, 2, 3 и воды.

Из выражения (2) следует, что статическая емкость преобразователя влажности существенно зависят от составляющей V_3 / Σ_3 , т. е. от объемного содержания воды, причем возрастает с ее увеличением, поскольку $\Sigma_3 = 81 \gg \Sigma_1 \Sigma_2$. Поэтому для увеличения объемного содержания влаги в межэлектродном промежутке преобразователя верхний слой гетероструктуры выполнен из двух областей: плотной области 3, обеспечивающей высокую динамическую емкость гетероструктуры, и пористой области 3. С увеличением толщины пористой области 3 возрастает объемная доля влаги m_{gr} чувствительного слоя, что приводит к росту статической емкости датчика влажности, однако, это, в свою очередь, приводит к общему возрастанию диэлектрического слоя конденсатора и снижению его полной емкости,

а также ухудшению структурной связи между статической и динамической емкостями. Оптимизация выражения (2) показывает, что статическая емкость датчика влажности наиболее эффективно изменяется с ростом его влагосодержания, когда отношение толщины пористой области 3 к толщине плотной области 2 верхнего слоя гетероструктуры составляет 2:1.

С учетом особенностей работы преобразователя влажности его компоненты реализованы следующим образом. Подложка выполнена из материала, обладающего высокой электропроводностью и стойкостью к агрессивным средам, например, из алюминия. Гигрочувствительный слой выполнен гетероструктурой из широкозонных, высокоомных полупроводников ZnSe *n*-типа проводимости и ZnTe *p*-типа проводимости. Эти материалам выбраны по следующим причинам; во-первых, как ZnSe так и ZnTe обладают высокими диэлектрическими свойствами (для ZnSp – 108–1010 ом·см, $\text{tg}\delta \leq 0,06$; $\Sigma = 8,6$ для ZnTe *p* = 107–108 ом·см; $\text{tg}\delta = 0,1$; $\Sigma = 10$); во-вторых, упомянутые материалы, как полупроводники, обладают низкой соответственной концентрацией дефектов $N_g = 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Для такой гетероструктуры толщина нижнего слоя 1 ZnSe составила 1,2 мкм и плотной области 3 верхнего слоя ZnTe гетероструктуры – 0,5 мкм.

Верхний электрод 5 преобразователя влажности так же, как и нижний выполнен из материала, также обладающего высокой электропроводностью и химической стойкостью к агрессивным средам, например, из алюминия. Во время работы преобразователя пары влаги мигрируют в его гигрочувствительный слой через слой верхнего электрода по всей поверхности. Инерционность преобразователя влажности определяется скоростью миграции влаги через слой его верхнего электрода. Поэтому для снижения инерционности верхний электрод выполнен в виде ячеистой структуры. С уменьшением толщины слоя верхнего электрода инерционность преобразователя снижается, однако, при этом значительно возрастает омическое сопротивление этого электрода, что приводит к возрастанию диэлектрических потерь, снижению чувствительности к неустойчивой работе. Изготовление верхнего электрода яче-

истой структурой позволяет существенно снизить инерционность датчика вследствие того, что влага будет мигрировать через более тонкие участки верхнего электрода, а металлическая сетка электрода, обладающая более высокой толщиной, снижает омическое сопротивление верхнего электрода и существенно повышает надежность его работы. Кроме того, с уменьшением толщины верхнего слоя растет суммарная масса влаги, мигрирующая вглубь гигрочувствительного слоя, что ведет к повышению чувствительности преобразователя.

Нижним токовводом преобразователя влажности является пассивная область нижнего электрода. Верхний токоввод выполнен из никеля толщиной 0,3 мкм. Он соединен с верхним электродом с помощью термокомпрессионной сварки или путем склеивания специальным составом, содержащим 40 % клеящего вещества и 60 % мелкодисперсного металлического порошка.

В схеме прибора для измерения влажности парогазовых сред (влагомера) преобразователь влажности включается в одно из плеч высокочувствительного задающего моста переменного тока. При воздействии парогазовой среды происходит миграция влаги через слой верхнего электрода внутрь гигрочувствительного слоя, в результате чего наступает изменение (приращение) полной емкости преобразователя влажности вследствие повышения суммарной диэлектрической проницаемости и роста динамической емкости гетероперехода за счет приращения $\Delta Q/\Delta U$.

При изменении емкости преобразователя влажности происходит разбалансировка моста и появление на входе регистрирующего прибора сигнала тем большего по величине, чем больше разбалансировка моста, которая прямопропорциональна изменению полной емкости преобразователя.

Чувствительность предлагаемого преобразователя влажности, выполненного структурой Al–ZnSe–ZnTe–Al по сравнению с аналогами повышается более, чем в четыре раза.

Литература

1. Берлинер, М. А. Измерения влажности. – М., 1993. – 240 с.
2. Патент Франции № 2160095.

УДК 681.3

ЭЛЕКТРОННЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**Сычик В. А., Уласюк Н. Н.***Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Разработан электронный источник электроэнергии, состоящий из закрепленного на валу металлического дискового ротора, на торцевой поверхности которого попарно размещены электреты с разноименными зарядами. Внешняя цепь содержит трансформатор с первичными обмотками. ЭДС электретного источника электроэнергии равна сумме ЭДС последовательно включенных секций трансформатора.

Ключевые слова: источник электроэнергии, электрет, напряженность электрического поля, дисковый ротор, электрический трансформатор.

ELECTRONIC POWER SOURCE**Sychyk V., Ulasiuk M.***Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. An electronic source of electric power has been developed, consisting of a metal disk rotor fixed on a shaft, on the end surface of which electrets with opposite charges are placed in pairs. The external circuit contains a transformer with primary windings. The EMF of the electret source of electric power is equal to the sum of the EMF of the transformer sections connected in series.

Key words: source of electricity, electret, electric field strength, disk rotor, electric transformer.

*Адрес для переписки: Сычик В. А., пр. Рокоссовского, 49–18, г. Минск 220095, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by*

Твердотельный источник электронной эмиссии представляет полупроводниковый многослойный катод, который состоит из подложки, полупроводниковой подложки n -типа проводимости.

Устройство относится к электронной технике и, может быть, использовано в производстве эффективных ненакаливаемых катодов электровакуумных приборов.

Цель разработки – повышение срока службы и плотности тока эмиссии многослойного полупроводникового катода. Катод выполнен в виде полупроводникового слоя 2 n -типа проводимости, имеющего омический контакт 1 , на слое n -типа расположен слой 3 p -типа того же полупроводника. К p -слою выполнен омический контакт 4 . На поверхность p -слоя, свободную от омического контакта, нанесен p^+ -слой узкозонного относительно материала p -слоя полупроводника, на котором расположен тонкий $(3–7)10^{-3}$ мкм слой активатора, например цезия, p - n -переход защищен слоем 7 диэлектрика. При пропускании через p - n -переход тока в прямом направлении электроны инжектируются из n -слоя сквозь p -слой в p^+ -слой, для которого являются горячими. Горячие электроны p -слоя с высокой вероятностью эмитируются в вакуум, благодаря снижению высоты потенциального барьера на границе активатор-вакуум.

Устройство относится к электронной технике и может быть использовано в производстве эффективных ненакаливаемых катодов электровакуумных приборов.

Целью разработки является повышение срока службы и плотности тока эмиссии ненакаливаемого многослойного полупроводникового катода.

Сущность изобретения состоит в том, что источник электронной эмиссии выполнен полупроводниковой структуры типа n - p -широкозонный –

p^+ -узкозонный полупроводник, причем узкозонный полупроводник неравномерно и $30–89$ сильно легирован акцепторной примесью, которая создает тянущее электрическое поле и в котором инжектированные из h -области в узкозонную p^+ -область электроны являются горячими. В силу последнего обстоятельства вероятность их выхода в вакуум сквозь поверхностный барьер, сниженный активатором, возрастает более чем в 10 раз. В результате существенно повышается интенсивность излучения электронного катода при одинаковой потребляемой энергии. При достижении допустимой эффективности излучения предложенный катод в сравнении с прототипом находится в облегченном режиме работы, что существенно повышает надежность его работы, в первую очередь долговечность.

В возобновляемых источниках электроэнергии эффективно используются устройства, осуществляющие преобразование потоков фотонов различной энергии и длины волны. Также находят применение источники электроэнергии, преобразующие постоянное электрическое поле в напряжение переменного тока [1, 2].

Нами разработан электретный источник электроэнергии, который может использоваться при производстве источников автономного электропитания для космических устройств и в микроэлектронике.

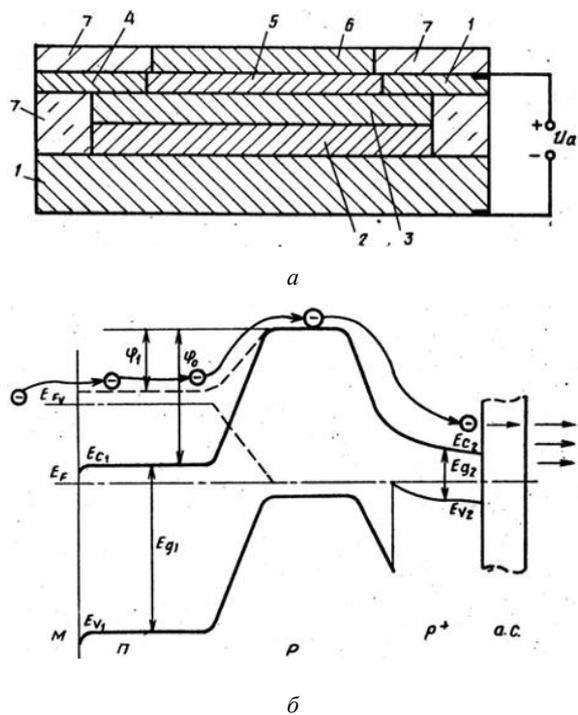
На рисунке 1 представлена структура электретного источника электроэнергии. На рисунке 1, *a* изображен многослойный катод, на рисунке 1, *б* изображена его зонная диаграмма.

Полупроводниковый многослойный катод состоит из подложки 1 , полупроводниковой подложки n -типа проводимости (n -область) 2 с омическим контактом 1 к ней. На подложке располо-

жен слой полупроводника p -типа (p -область) 3 с омическим контактом 4 к нему. На поверхности p -слоя, свободной от омического контакта, расположен p^+ -слой узкозонного по отношению к p -слою полупроводника 5, покрытого слоем 6 активатора. Зона p - n -перехода покрыта защитным слоем 7 диэлектрика. В случае кремниевой подложки n -типа омический контакт выполняется из Bi , Mg , Sb или Te .

Полупроводниковая p - n -структура представляет собой p - n -переход, выполненный из полупроводников n -типа 2 и p -типа 3. Она защищена слоем диэлектрика 7, который стабилизирует работу полупроводниковой p - n -структуры.

P -область 3 перехода выбрана такой толщины, чтобы инжектированные в нее из n -области электроны не рекомбинировали с дырками области 3. Оптимальное значение толщины области 3 – dQ , составляет 0,6–0,9 значения диффузионной длины Ld носителей в области 3. Для кремниевго гомоперехода толщина $d_0 \approx 0,15$ –0,2 мкм. Концентрация примесей является оптимальной для данного типа переходов, причем концентрация электронов n -области $2nh$ много больше концентрации дырок p -области 3 Pp , т. е. $(102$ – $104)Pp$, чтобы обеспечить одностороннюю инжекцию электронов к поверхности излучения, покрытой активатором 6.



а – многослойный катод; б – зонная диаграмма

Рисунок 1 – Структура электретного источника электроэнергии

Контактирующая с p -областью 3 полупроводниковой p - n -структуры p -область (слой) 5 является узкозонной. Например, для кремниевой p -области 3 с $E_g = 1,11$ эВ, где E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника, контактирующая p^+ -область 5 выполнена из арсенида индия с $E_{g1} = 0,36$ эВ.

Такой контакт широкозонной p - и узкозонной p^+ -полупроводниковых областей 3 и 5 приводит к тому, что инжектируемые в p^+ -область 5 электроны, являются горячими и обладают высокой энергией. Кроме того, p -область 5 обеднена электронами, в результате чего путем диффузии происходит эффективное перемещение электронов к ее поверхности, с которой электроны могут испускаться. Структура p -широкозонный 3 – p^+ -узкозонный полупроводник 5 является изотипным гетеропереходом и для обеспечения его высокого коэффициента передачи необходимо хорошее согласование в постоянных решетки составляющих p - и p^+ -областей. Толщина p^+ -области 5 также ограничивается минимальной рекомбинацией в ней электронов и не превышает диффузионной длины носителей для выбранного материала области 5.

Используемый в структуре многослойного катода изотипный гетеропереход, представляющий контакт p - широкозонного слоя 3 и p^+ -узкозонного слоя 5 обеспечивает преобразование обычных электронов, диффундирующих через слой 3, в горячие электроны, попавшие в слой 5, которые обладают большой избыточной энергией и высокими возможностями к излучению со свободной поверхности.

Для повышения эффективности излучения катода путем усиления инжекции электронов из p^+ -слоя узкозонного полупроводника 5 в слой 6 активатора узкозонный p^+ -слой 5 может быть неравномерно легирован акцепторной примесью, распределение которой является параболическим с максимумом со стороны p - p^+ -изотипного гетероперехода. Такое распределение примеси создает тянущее электрическое поле, осуществляющее эффективное выталкивание неосновных носителей (электронов) из p^+ -слоя 5 в активированный слой 6.

Второй омический контакт 4 является ускоряющим электродом. Он для кремниевго p - n гомоперехода, т. е. к n -слою, выполняется из Al .

К омическим контактам полупроводниковой структуры прикладывается питающее напряжение постоянного тока, являющееся напряжением прямой полярности к p - n -гомопереходу их слоев 2 и 3.

При помещении электронного многослойного катода в вакуумированный баллон электровакуумного прибора и подаче питающего напряжения прямой полярности на омические контакты 1 и 4 полупроводниковой структуры потенциальный барьер p - n -гомоперехода снизится, на величину qU_a , и станет равным $\phi_1 = \phi_0 - \phi U_a$, где U_a – падение напряжения на p - n -гомопереходе между слоями 2 и 3, q – величина заряда электрона. В результате резко возрастает инжекция электронов из n -области 2 в p -область 3 полупроводниковой структуры по диффузионному механизму. Поскольку толщина p -слоя 3 не превышает диффузионной длины электронов, поток электронов устремляется к узкозонной p^+ -области 5 с высоким обеднением электронами, входит в эту область, где электроны становятся горячими, т. е. обладают высокой энергией, эффективно диффундируют и

одновременно дрейфуют через узкозонную p^+ -область 5 к ее поверхности и проходят в активированный слой 6 с низкой работой выхода, с поверхности которого электроны эффективно излучаются. В случае отсутствия активированного слоя 6 электроны могут эффективно излучаться в вакууме и внешней поверхностью p^+ -области 5.

С ростом питающего напряжения при условии минимальных потерь электронов в p^- и p^+ -областях поток излучаемых электронов практически экспоненциально возрастает с ростом Uq . Поскольку $p-n$ -гомопереход смещен в прямом направлении, его напряжение невелико и изменяется в пределах 0,9–2,5 В, при этом поток излучаемых электронов возрастает на несколько порядков.

Экспериментальное устройство – твердотельный источник электронной эмиссии размером 3×3 мм полупроводниковой структурой $nSi-pSi-r+InSb$. При этом толщина слоя nSi составляет (0,8–1) мкм слоя pSi – (0,15–0,2) мкм и слоя $r+InAs$ – (0,2–0,3) мкм. Активированным слоем является слой цезия толщиной (3–7) 10^{-3} мкм.

Экспериментальный катод обеспечивает эмиссию электронов плотностью 20–50 mA/mm^2 при питающем напряжении 1,2–1,8 В и комнатной температуре. Нестабильность эмиттируемого катодом электронного потока не превышает 30 %.

Технико-экономические преимущества предлагаемого электронного многослойного катода в сравнении с аналогами следующие:

- более чем на порядок возрастает срок службы (с 103 до 104–105 у часов);
- повышается максимальная плотность тока эмиссии в 10 и более раз;
- более чем на порядок снижается нестабильность работы твердотельный источник электронной эмиссии с (5–8) раз у прототипа, до 0,3 у предлагаемого устройства.

Многослойный полупроводниковый катод, содержащий подложку из полупроводника n -типа с омическим контактом к ней, слой p -типа с омическим контактом; расположенный, на подложке n -типа, слой активатора на поверхности слоя p -типа, свободной от омического контакта, причем области $p-n$ -перехода покрыты слоем диэлектрика, отличающийся тем, что, с целью повышения срока службы л плотности тока эмиссии, между слоем p -типа и слоем активатора расположен p^+ -слой узкозонного по отношению к слою p -типа полупроводника.

Литература

1. Губкин, А. Н. Электреты. М.: Наука, 1998. – 164 с.
2. Электретные источники электроэнергии / В. А. Сычик [и др.] // Материалы МНТК «Демографические проблемы Беларуси», ч. 3. Мн., 1999. – С. 54.

УДК 621.793.18

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФТОРУГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ИОННО-ЛУЧЕВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ МИШЕНЕЙ

Телеш Е. В.¹, Сафронов Н. В.², Шевчик Е. В.¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

²ОАО «Минский НИИ радиоматериалов»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследовано влияние материала мишени на основные оптические характеристики свойства фторуглеродных покрытий, полученных ионно-лучевым распылением. Установлено, что покрытия, полученные распылением мишени из политетрафторэтилена, обладали более высокой прозрачностью, шириной запрещенной зоны и низким коэффициентом преломления.

Ключевые слова: фторуглеродные покрытия, оптические характеристики, ширина запрещенной зоны, ионно-лучевое распыление.

OPTICAL CHARACTERISTICS OF FLUOROCARBON COATINGS OBTAINED BY ION BEAM SPUTTERING OF VARIOUS TARGETS

Telesh E.¹, Safronov N.², Shevchik E.¹

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

²OJSC Minsk Research Institute of Radiomaterials

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The influence of the target material on the main optical characteristics of the properties of fluorocarbon coatings obtained by ion-beam sputtering has been studied. It was found that coatings obtained by sputtering a polytetrafluoroethylene target had higher transparency, a wider band gap, and a low refractive index.

Key words: fluorocarbon coatings, optical characteristics, band gap, ion-beam sputtering.

Адрес для переписки: Телеш Е. В., ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: etelesh@bsuir.by

Одним из наиболее перспективных материалов, обладающим уникальным комплексом физико-химических свойств, являются соединения

фтора с углеродом. При использовании фторуглеродных покрытий в качестве оптических и защитных покрытий для оптических приборов важным

параметром является их способность преломлять и пропускать поток света, обладать минимальной пористостью.

Для получения покрытий можно применить распыление мишени из политетрафторэтилена (ПТФЭ), составной мишени из ПТФЭ и графита, а также графитовой мишени [1–3].

Задачей данных исследований было исследование влияния материала распыляемой мишени на оптические характеристики фторуглеродных покрытий. Схема ионно-лучевого распыления (ИЛР) мишеней различного состава представлена на рисунке 1. Для компенсации положительного заряда на составной мишени 2 и мишени из ПТФЭ и применялся термокатод 3 из вольфрама. Ионный источник 1 представлял собой ускоритель с анодным слоем. В качестве подложки 4 использовалось оптическое стекло К8, в качестве рабочих газов – аргон, метан и хладон-218 (C_3F_8).

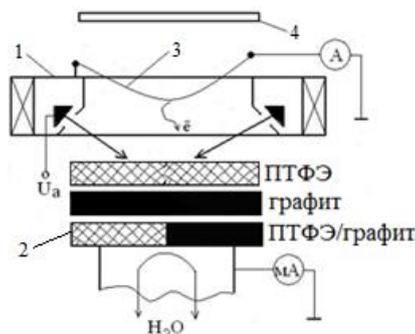


Рисунок 1 – Схема ионно-лучевого распыления мишеней различного состава

Таблица 1 – Исследования влияния газовой среды на пропускание покрытий

Газовая среда	Парциальное давление хладона, CH_4 , Па	Рабочее давление, Па	U_a , кВ	T , %
Ag+пары CF_4	–	$2,3 \cdot 10^{-1}$	1,3	91,0
Пары CF_4	–	$2,4 \cdot 10^{-1}$	2,5	92,5
Ag+хладон	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-1}$	1,0	93,0
Ag+хладон	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-1}$	1,2	93,5
Ag+ CH_4	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-1}$	2,0	91,7
Ag+ CH_4	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	1,9	92,7
Ag+ CH_4	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	2,0	92,0

Измерение оптического пропускания покрытий осуществлялось в диапазоне 350–900 нм с помощью спектрофотометра PROSCAN.

В таблице 1 приведены результаты по влиянию состава газовой среды на пропускание T покрытий, полученных ИЛР мишени из ПТФЭ, на длине волны $\lambda = 555$ нм. Установлено, что при распылении в парах политетрафторэтилена наблюдается улучшение параметров покрытий. Добавка к рабочему газу хладона-218 также привела к росту пропускания до 93,5 %. Также было установлено, что при величине пар-

циального давления метана CH_4 от $1,8 \cdot 10^{-2}$ до $5,3 \cdot 10^{-2}$ Па оптические характеристики практически не изменились.

Нагрев подложки до 450 К позволил повысить пропускание до 96,5 % (рисунок 2)

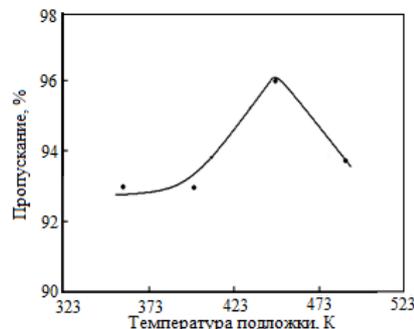


Рисунок 2 – Зависимость пропускания от температуры подложки

На рисунке 3 представлена зависимость пропускания фторуглеродных покрытий, полученных распылением составной мишени, от парциального давления хладона. Максимальное пропускание составило 96 %.

Покрытия, сформированные реактивным ИЛР мишени из графита в среде хладона, обладали максимальным пропусканием 85 % и имели светло-коричневую окраску.

Ширина запрещенной зоны рассчитывалась путем анализа спектров пропускания. Для покрытий, полученных распылением мишени из политетрафторэтилена, она составила 3,32–3,38 эВ, для составной мишени – 3,10–3,25 эВ, для мишени из графита – 2,9–3,0 эВ и практически не зависела от режимов формирования покрытий.

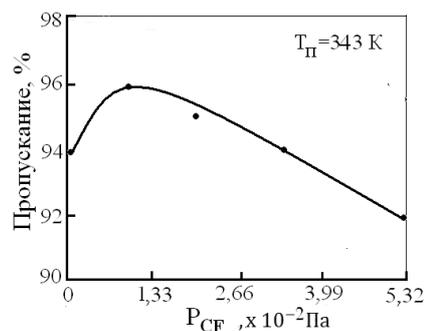


Рисунок 2 – Зависимость пропускания от парциального давления хладона

Измерение коэффициента преломления n с применением эллипсометра ЛЭФ-3 показало, что покрытия, полученные ИЛР мишени из ПТФЭ, обладали значениями $n = 1,35–1,63$, которые зависели от состава газовой среды, в частности n увеличивался с ростом давления метана. Для покрытий, полученных распылением составной мишени, n составил 1,6–2,1 и увеличивался с ростом температуры подложки. Коэффициент преломления составил 1,40–1,68 для покрытий, сформиро-

ванных реактивным ИЛР мишени из графита. Увеличение парциального давления хладона, наличие положительного потенциала на мишени способствовало снижению n , а повышение температуры подложки – росту n .

Таким образом, проведенные исследования позволили определить основные оптические характеристики фторуглеродных покрытий, полученных ионно-лучевым распылением мишеней с разным составом.

Литература

1. Телеш, Е. В. Ионно-лучевое распыление мишени из политетрафторэтилена / Е. В. Телеш, В. А. Точный // Приборостроение – 2021: материалы 14-й Междун. научно-технической конференции (Минск, 18–20 но-

ября 2021 г.) / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2021 – С. 355–356.

2. Шевчик, Е.В. Формирование фторуглеродных покрытий ионно-лучевым распылением составной мишени / Е. В. Шевчик, А. Н. Потылкин, Е. В. Телеш // Электронные системы и технологии: сборник материалов 59-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования БГУИР. – С. 539–541.

3. Телеш, Е. В. Формирование фторуглеродных покрытий реактивным ионно-лучевым распылением мишени из графита / Е. В. Телеш, А. Н. Потылкин // Актуальные проблемы физики, электроники и энергетики [Электронный ресурс]: электронный сборник статей I международной научно-практической конференции, Новополоцк, 27–28 окт. 2022 г. / Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой. – Новополоцк, 2023. – С. 157–161.

УДК 621.793.18

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА РАБОЧЕГО ГАЗА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФТОРУГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРЯМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ИОННЫХ ПУЧКОВ

Телеш Е. В., Шевчик Е. В., Курбако Е. Г., Перепечко Е. Ю.

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

Аннотация. Исследовано влияние парциального давления хладона-218 на свойства фторуглеродных покрытий, полученных прямым осаждением из ионных пучков. В результате проведенных исследований определен оптимальный диапазон давления хладона-218 ($7,98 \cdot 10^{-2}$ – $1,06 \cdot 10^{-1}$) для формирования покрытий с оптической прозрачностью до 83 %, углом смачивания до 75 градусов и шириной запрещенной зоны около 2,8 эВ.

Ключевые слова: фторуглеродные покрытия, прямое осаждение, электрофизические характеристики, ширина запрещенной зоны, оптическое пропускание, угол смачивания.

INFLUENCE OF WORKING GAS COMPOSITION ON THE CHARACTERISTICS OF FLUOROCARBON COATINGS OBTAINED BY DIRECT DEPOSITION FROM ION BEAMS

Telesh E., Shevchik E., Kurbako E., Perepechko E.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The influence of the partial pressure of freon-218 on the properties of fluorocarbon coatings obtained by direct deposition from ion beams has been studied. As a result of the research, the optimal pressure range of freon-218 ($7,98 \cdot 10^{-2}$ – $1,06 \cdot 10^{-1}$) was determined for the formation of coatings with optical transparency of up to 83 %, a contact angle of up to 75 degrees and a band gap of about 2,8 eV.

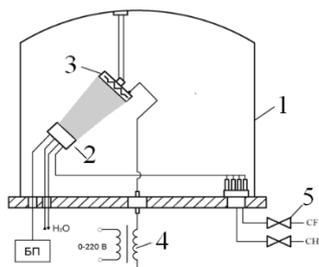
Key words: fluorocarbon coatings, direct deposition, electrophysical characteristics, band gap, optical transmission, contact angle.

*Адрес для переписки: Телеш Е. В., ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: etelesh@bsuir.by*

Тонкопленочные фторуглеродные слои применяются в приборостроении в качестве low-k диэлектриков, оптических, гидрофобных, защитных покрытий [1]. Для синтеза фторуглеродных покрытий обычно используются плазменные разряды в углерод- и фторсодержащих газах с применением методов ВЧ плазмохимического осаждения, индуктивно-связанной плазмы, импульсной плазмы высокой плотности [2]. На характеристики покрытий определяющее влияние оказывают состав рабочего газа, мощность плазменного разряда, величина отрицательного смещения на подложке, температура подложки и т. п.

Методы, основанные на нанесении тонкопленочных покрытий из ионных пучков, позволяют изменять свойства пленок посредством регулирования энергии ионов, плотности ионного потока и его состава [3]. В данной работе будет исследовано влияние парциального давления хладона-218 (C_3F_8) в рабочем газе на характеристики фторуглеродных покрытий.

Формирование фторуглеродных покрытий проводили на модернизированной установке вакуумного напыления ВУ-1А, оснащенной ионным источником на основе торцевого холлового ускорителя (ГХУ) (рисунок 1).



1 – вакуумная камера; 2 – ТХУ;
3 – подложкодержатель с подогревом;
4 – трансформатор питания нагревателя;
5 – газовые натекатели

Рисунок 1 – Схема нанесения покрытий прямым осаждением из ионных пучков

Остаточный вакуум не превышал значений $(4-5) \cdot 10^{-3}$ Па. Рабочее давление составляло $2,6 \cdot 10^{-1}$ Па. Ток разряда составлял 2 А, напряжение на аноде – 78–80 В. Покрытия наносились на подложки из кремния и стекла К8. Температура подложек составляла 430–450 К.

Измерение оптического пропускания покрытий, нанесенных на подложки из стекла, осуществлялось в диапазоне 380–1080 нм. На рисунке 2 приведена зависимость пропускания покрытий на $\lambda = 555$ нм, полученных при различных парциальных давлениях хладона. Установлено, что увеличение парциального давления хладона практически не влияло на величину пропускания которой составляло 81–83 %. Следует отметить высокую прозрачность покрытий даже при низком содержании хладона в рабочем газе и относительно невысокой температуре подложки, что связано с высокой степенью химического взаимодействия между углеродом и фтором.

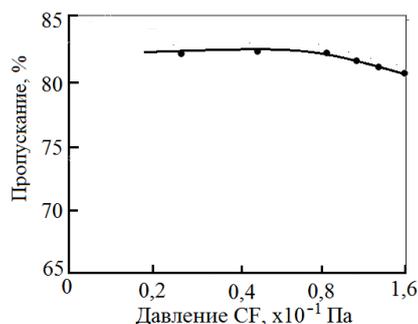


Рисунок 2 – Зависимость оптического пропускания покрытий на $\lambda = 555$ нм, полученных при различных парциальных давлениях хладона

На рисунке 3 приведена зависимость ширины запрещенной зоны E_g от парциального давления хладона. E_g увеличилась с 2,36 до 2,8 эВ при давлении последнего $1 \cdot 10^{-1}$ Па, что также свидетельствует о стимулировании химического взаимодействия между углеродом и фтором.

Для измерения электрофизических параметров применяли МДП структуры. Установлено, что значение диэлектрической проницаемости ϵ и

тангенса диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ неоднозначно зависело от давления фторсодержащего газа (таблица 1). Также наблюдалось увеличение удельного объемного сопротивления ρ_v до давления хладона $7,98 \cdot 10^{-2}$. Дальнейший рост содержания хладона в рабочем газе привел к резкому снижению ρ_v .

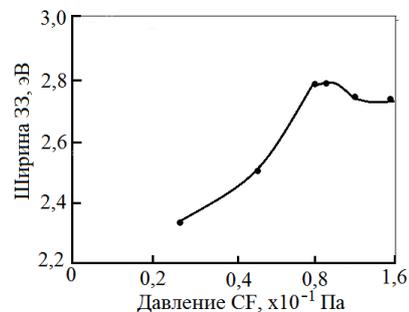


Рисунок 3 – Зависимость ширины запрещенной зоны покрытий, полученных при различных парциальных давлениях хладона

Таблица 1 – Результаты измерений электрофизических характеристик фторуглеродных покрытий

Номер образца	Давление CF, Па	ϵ	$\text{tg}\delta$	ρ_v , Ом·м
1	$2,66 \cdot 10^{-2}$	2,6	0,22	$3,0 \cdot 10^4$
2	$5,32 \cdot 10^{-2}$	3,3	0,18	$2,9 \cdot 10^4$
3	$7,98 \cdot 10^{-2}$	1,76	0,14	$6,7 \cdot 10^4$
4	$1,06 \cdot 10^{-1}$	4,5	0,14	$3,3 \cdot 10^4$
5	$1,33 \cdot 10^{-1}$	3,2	0,25	$2,0 \cdot 10^4$
6	$1,59 \cdot 10^{-1}$	2,8	0,52	$1,2 \cdot 10^4$

Угол смачивания θ поверхности фторуглеродного покрытия дистиллированной водой измерялся с применением гониометра ЛК-1. Зависимость θ от парциального давления хладона носила сложный характер (рисунок 4). Максимальный угол смачивания 75° наблюдался при давлении хладона $1,33 \cdot 10^{-1}$ Па.

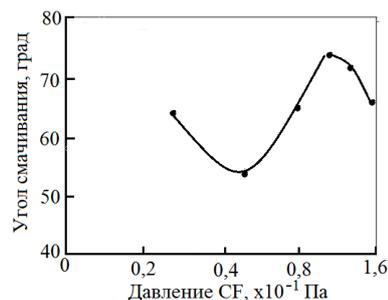


Рисунок 4 – Зависимость угла смачивания фторуглеродного покрытия от парциального давления хладона

Таким образом, проведенные исследования позволили определить оптимальное давление хладона-218 для синтеза фторуглеродных покрытий с высокой прозрачностью и хорошей гидрофобностью.

Литература

1. Лучников, А. П. Микроструктура и электрофизические свойства фторполимерных пленок для МЭМС и

нанoeлектроники / А. П. Лучников, П. А. Лучников, А. С. Сигов // Нано- и микросистемная техника. – 2007. – № 12 (89). – С. 34–40.

2. Jacobsohn, L. G Film growth and relationship between microstructure and mechanical properties of a-C:H:F films deposited by PECVD / L. G Jacobsohn, D. F.

Franceschini // Diamond and Related Materials. – 2001. – № 10 (2). – P. 125–131.

3. Телеш, Е. В. Формирование оптических покрытий прямым осаждением из ионных пучков/ Е. В. Телеш, Н. К. Касинский // Контенант. – 2014. – Т. 1. – № 2. – С. 27–30.

УДК 681.7.023.72

КОМПЛЕКСНАЯ ОБРАБОТКА ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ С ПОЛНЫМИ СФЕРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Филонова М. И., Козерук А.С., Андрушкевич И. В., Чернышенко Д. Ю.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрена последовательность операций групповой обработки оптических деталей с полными сферическими поверхностями и приведена технологическая оснастка для реализации предлагаемых операций.

Ключевые слова: алмазонасные рабочие участки, среда под давлением, тонкий, инструмент в виде полого цилиндра.

COMPREHENSIVE PROCESSING OF OPTICAL PARTS WITH FULL SPHERICAL SURFACES

Filonova M., Kozeruk A., Andrushkevich I., Chernyshenko D.

BeloRussian Federation National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

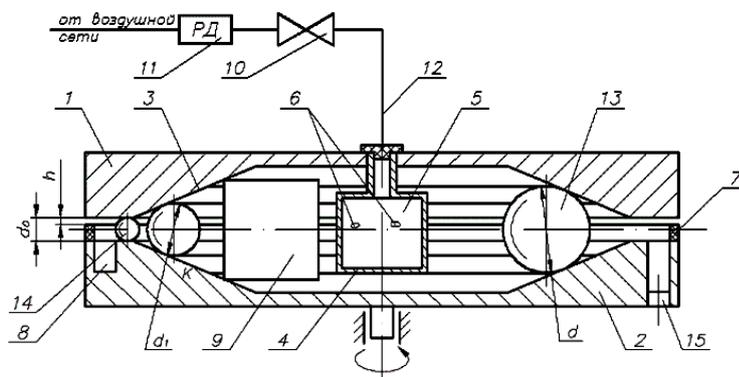
Abstract. The article considers the sequence of operations for group processing of optical parts with full spherical surfaces and provides technological equipment for the implementation of the proposed operations.

Keywords: diamond-bearing working areas, pressurized environment, thin, hollow cylinder tool.

Адрес для переписки: Филонова М. И., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: filonovami@bntu.by

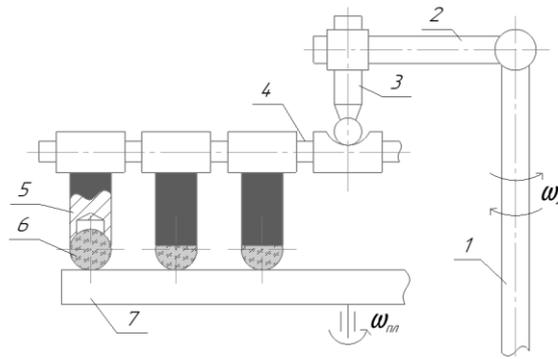
Современное направление развития оптического приборостроения – его миниатюризация. Такой подход требует, помимо прочего, изготовления микролинз для объективов – двояковыпуклых, плосковыпуклых, двояковогнутых, плосковогнутых, а также положительного и отрицательного менисков. Существующие приемы обработки таких оптических деталей сводятся к поэтапному их шлифованию в три перехода абразивными суспензиями микропорошков М40, М20, М10 и полированию в два перехода суспен-

зиями окиси тория и полирита на многошпиндельных рычажных шлифовально-полировальных станках модели ШП. Технология энерго- и трудоемкая. При ее реализации необходимо выполнять крепление (блокировку) заготовок на специальном наклеечном приспособлении смолы, нагревая наклеечник, заготовку детали и смолу. Нагревание последней приводит к выбросу в атмосферу концентратов веществ фенольной группы и, следовательно, к загрязнению окружающей среды.



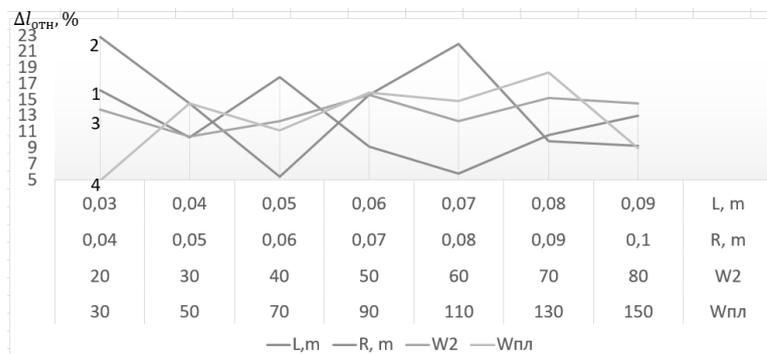
1 и 2 – диски с коническими алмазонасными участками 3; 9 – исходная кубическая заготовка и ее промежуточное состояние 13; 10, 11, 12 – элементы пневмосети

Рисунок 1 – Схема технологической оснастки для формирования оптических деталей с полной сферической поверхностью



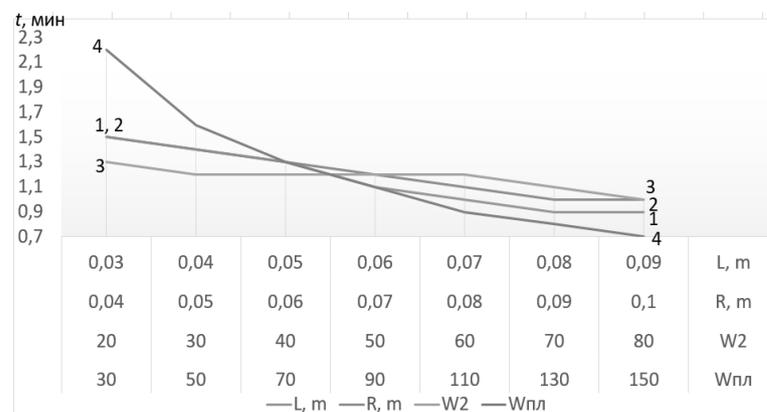
1 – приводная стойка; 2 – рычаг; 3 – палец рычага; 4 – коромысло; 5 – обрабатывающий инструмент в виде полого цилиндра; 6 – заготовка детали с полной сферической поверхностью; 7 – приводной диск

Рисунок 2 – Схема многоместного устройства для финишной обработки деталей с полными сферическими поверхностями



L при $\omega_{пл} = 80$ об/мин, $\omega_2 = 50$ об/мин, $R = 70$ мм (1); R при $\omega_{пл} = 80$ об/мин, $\omega_2 = 50$ об/мин, $L = 55$ мм (2); ω_2 при $\omega_{пл} = 80$ об/мин, $R = 70$ мм, $L = 55$ мм (3); $\omega_{пл}$ при $\omega_2 = 50$ об/мин, $R = 70$ мм, $L = 55$ мм (4)

Рисунок 3 – Зависимость $\Delta I_{отн}$ от изменяющихся



L при $\omega_{пл} = 80$ об/мин, $\omega_2 = 50$ об/мин, $R = 70$ мм (1); R при $\omega_{пл} = 80$ об/мин, $\omega_2 = 50$ об/мин, $L = 55$ мм (2); ω_2 при $\omega_{пл} = 80$ об/мин, $R = 70$ мм, $L = 55$ мм (3); $\omega_{пл}$ при $\omega_2 = 50$ об/мин, $R = 70$ мм, $L = 55$ мм (4)

Рисунок 4 – Зависимость времени обработки $t_{обр}$ от изменяющихся

Более перспективной является обработка рассматриваемых оптических деталей по технологии получения шаровидных деталей из хрупких материалов, в том числе и из оптического стекла. При реализации этой технологии в качестве исходной заготовки используют кубики с припуском на сторону 0,1 мм по сравнению с готовым диаметром. Кубики первоначально направляют на операцию

галтовки, где они приобретают шаровидную форму. При этом используют устройство с двумя коническими алмазосносными участками, установленными соосно и образующими клиновидную рабочую зону, в которой под действием тангенциально направленной среды под давлением кубические заготовки совершают гарантированное многоосное (трехосное) движение вдоль рабочих

участков. В результате такой кинематики происходит сьем припуска с исходных кубических заготовок, и они принимают шаровидную форму.

Схема технического решения, позволяющего реализовать изложенный прием галтовки, представлена на рисунке 1.

После галтовки заготовки подвергаются первоначально шлифованию по переходам и последующему полированию с использованием многоместного устройства, принципиальная схема которого приведена на рисунке 2.

Для исследования характера обработки деталей с полными сферическими поверхностями на финишной стадии по предлагаемой схеме выполнено математическое моделирование рабочей зоны этой схемы. В результате получено выражение

$$\Delta l_k = \Delta r \sqrt{\Delta r_x^2 + \Delta r_y^2 + \Delta r_z^2}, \quad (1)$$

используя которое по формуле

$$L_{\text{рез}} = \sum_{k=0}^n \Delta l_k, \quad (2)$$

представляется возможность определить распределение путей резания по обрабатываемой поверхности в зависимости от режимов процесса шлифования и полирования. Определение закономерностей распределения путей резания $L_{\text{рез}}$ по сферической поверхности заготовки.

Используя выражение (1), выполнен расчет распределения относительных путей резания $\Delta l_{\text{отн}}$ в определенном образом выбранных на обрабатываемой поверхности опорных точках. Расчет выполнялся для таких параметров режимов обработки по методу свободного притирания, как амплитуда возвратно-вращательного перемещения устройства относительно приводного диска L и угловой скорости его относительного вращения $\omega_{\text{пл}}$, угловой скорости вращения входного звена исполнительного механизма базового технологического оборудования ω_2 , а также расстояния обрабатывающий инструмент в виде полого цилиндра от оси симметрии приводной стойки R . Результаты расчета изложены на рисунках 3 и 4.

Характер распределения относительных путей резания на рисунке 3 указывает на ощутимую зависимость $\Delta l_{\text{отн}}$ от величины принятых в нашем случае параметров режимов обработки (L , $\omega_{\text{пл}}$, ω_2 и R). В частности, в случае регулирования расстояния обрабатывающего инструмента 5 от оси симметрии приводной стойки 1 наблюдается три максимума: для R равном 60 , 100 и 90 мм. И поскольку для этих значений R относительные пути резания $\Delta l_{\text{отн}}$ составляют $6,7$, $9,3$ и $9,8$ % соответственно, то это значит, что заготовки деталей, расположенные в инструменте на отмеченных расстояниях от приводной стойки, будут обрабатываться с разной интенсивностью. Это позволяет совместить операции предварительной, основной и финишной обработки в одном технологическом цикле.

Что касается остальных наладочных параметров (L , ω_2 и $\omega_{\text{пл}}$) то их следует назначать такими, при которых будут обеспечиваться максимальные как точность, так и производительность обработки, т. е. будут достигнуты минимальные значения $\Delta l_{\text{отн}}$ и $t_{\text{обр}}$. Для выполнения отмеченного условия требуется проводить совместный анализ результатов расчета, представленных на рисунках 3 и 4, учитывая при этом виды операций – шлифование и полирование. Такой анализ показывает, что на стадии шлифования, когда помимо точности шлифованного шарика (эта точность всегда ниже полированного шарика) необходимо обеспечить приемлемое (минимальное) время обработки, целесообразно назначать $L = 70$ мм, $\omega_2 = 30$ об/мин, $\omega_{\text{пл}} = 150$ об/мин.

Литература

1. Технология оптических деталей / М. Н. Семибратов [и др.]. М.: Машиностроение, 1978. – 415 с.
2. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. – Мн.: ВУЗ-ЮНИТИ, 1997. – 176 с.
3. Моделирование процесса формообразования стеклянных шариков по методу свободного притирания / А. С. Козерук [и др.] // Наука и техника. – 2023. – Т. 22, № 3. С. 193–198.

УДК 612.8

МЕТОДЫ ПОДГОНКИ УШНОГО ИМПЛАНТА К 3D-МОДЕЛИ ГОЛОВЫ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МРТ

Франко Е. П.¹, Смольская Т. С.¹, Кудина А. В.¹, Габец В. Л.²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной статье рассматриваются методы подгонки имплантов к 3D-модели головы, созданной на основе данных МРТ. Особое внимание уделено сравнению алгоритмов Iterative Closest Point (ICP), Random Sample Consensus (RANSAC) и метода наименьших квадратов (Least Squares Fitting). Проведен анализ точности подгонки каждого метода.

Ключевые слова: 3D-моделирование, подгонка импланта, ICP, RANSAC, МРТ, метод наименьших квадратов.

METHODS FOR FITTING AN EAR IMPLANT TO A 3D MODEL OF THE HEAD BASED ON MRI DATA

Franko E.¹, Smolskaya T.¹, Kudina A.¹, Gabets V.²

¹BelaRussian Federation State University of Informatics and Radioelectronics

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. This article discusses methods for fitting implants to a 3D model of the head, created based on MRI data. Special attention is given to the comparison of the Iterative Closest Point (ICP), Random Sample Consensus (RANSAC), and Least Squares Fitting algorithms. The accuracy of each fitting method is analyzed.

Key words: 3D modeling, implant fitting, ICP, RANSAC, MRI, least squares fitting.

Адрес для переписки: Смольская Т. С., ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220089, Республика Беларусь
e-mail: diyolker@gmail.com

Предоперационное планирование с использованием 3D-моделей головы, основанных на данных МРТ, становится важным инструментом для хирургов, занимающихся установкой ушных имплантов. Точное соответствие анатомических структур и импланта позволяет значительно повысить вероятность успешной операции, снизить время вмешательства и минимизировать риски для пациента. Однако успех операции зависит от точности подгонки импланта к анатомическим особенностям пациента. В данной работе рассматриваются методы подгонки, которые могут быть использованы для точной настройки импланта на основе 3D-модели головы [1].

Методы подгонки имплантов. Существует несколько методов, которые могут быть использованы для подгонки импланта, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Основное внимание в статье уделяется следующим трем методам:

1. Iterative Closest Point (ICP). Алгоритм ICP является одним из наиболее популярных методов подгонки 3D объектов. Он работает путем минимизации расстояния между ближайшими точками двух моделей, что позволяет эффективно выравнивать их в пространстве. В процессе работы алгоритм последовательно ищет соответствия между точками и обновляет параметры трансформации, чтобы улучшить выравнивание. ICP требует хорошего начального приближения, поскольку он склонен к нахождению локальных минимумов, что может привести к неудачным

результатам в случае неправильного выбора начальных позиций. Тем не менее, ICP обеспечивает высокую точность при отсутствии значительных дефектов или шума в данных [2].

2. Random Sample Consensus (RANSAC). Метод RANSAC предназначен для работы с шумными данными и наличием выбросов, что делает его особенно полезным в приложениях, где данные могут содержать значительные искажения. Основная идея метода заключается в повторном выборе случайных подмножеств точек и подгонке модели на основе согласованных точек, что позволяет игнорировать выбросы и сосредоточиться на достоверных данных. Несмотря на его устойчивость к шуму, выполнение RANSAC может быть медленнее из-за необходимости многократных итераций, что требует большего времени на обработку данных [3].

3. Метод наименьших квадратов (Least Squares Fitting). Этот метод минимизирует сумму квадратов расстояний между точками импланта и черепа, что позволяет находить оптимальные параметры для подгонки модели. Метод наименьших квадратов отличается простотой реализации и эффективностью, особенно при работе с относительно чистыми данными. Тем не менее, он чувствителен к выбросам, которые могут значительно исказить результаты. Поэтому требуется тщательная обработка данных перед применением данного метода, что может включать фильтрацию и предварительный анализ данных для выявления и устранения аномалий [4].

Экспериментальная часть. Для тестирования точности каждого метода использовалась 3D-модель черепа, созданная на основе данных МРТ. Имплант был смоделирован отдельно и помещен в определенную часть черепа с использованием каждого из методов подгонки [3].

Все этапы исследования были проведены в Blender, с использованием нескольких дополнительных аддонов и специализированных библиотек для анализа и подгонки 3D-объектов, что позволило эффективно контролировать процесс подгонки и анализировать точность результатов.

3D-модели черепа были получены на основе данных МРТ [4]. Для этого данные в формате DICOM были конвертированы в формат STL с использованием стороннего инструмента. В Blender были проведены все необходимые операции по сегментации, обработке и улучшению модели черепа. Используя встроенные инструменты Blender для редактирования сетки и скульптинга, была проведена ручная сегментация и подготовка модели для дальнейшей подгонки импланта.

Имплант, созданный в формате STL, был импортирован в ту же программную среду. Для тестирования использовались все три метода (ICP, RANSAC и Least Squares Fitting), и их результаты были проанализированы с точки зрения точности и устойчивости к шуму.

Результаты. В ходе исследования была проведена оценка точности трех методов подгонки импланта к 3D-модели головы: Iterative Closest Point (ICP), Random Sample Consensus (RANSAC) и метода наименьших квадратов (Least Squares Fitting). Для каждого метода были измерены средние значения точности и их погрешности. На рисунке 1 представлено графическое сравнение точности методов подгонки.

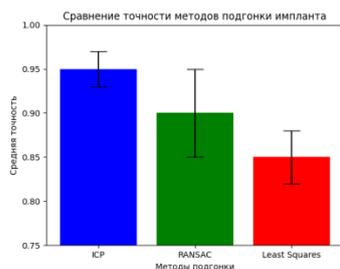


Рисунок 1 – Сравнение точности методов подгонки

Метод ICP продемонстрировал наивысшую точность (95 %) с минимальной погрешностью (2 %), что делает его предпочтительным выбором для большинства задач по подгонке имплантов.

Метод RANSAC показал несколько более низкую точность (90 %) с большей погрешностью (5 %), что может быть обусловлено его устойчивостью к выбросам в данных. Метод наименьших квадратов продемонстрировал наименьшую точность (85 %) при средней погрешности (3 %), что связано с чувствительностью метода к исходным параметрам данных.

Сравнение методов подгонки показало следующие результаты:

1. ICP продемонстрировал наилучшую точность в ситуациях с минимальными дефектами в данных и при хорошем начальном приближении. Однако метод оказался чувствителен к шуму и локальным минимумам, что ограничивает его применимость в реальных клинических условиях.

2. RANSAC был наиболее устойчивым к шуму данных и выбросам, что делает его предпочтительным выбором в ситуациях с неидеальными данными. Однако его выполнение требует больше времени из-за необходимости повторных итераций.

3. Метод наименьших квадратов показал хорошие результаты при работе с чистыми данными, но был менее точен при наличии шумов и отклонений в данных.

Заключение. На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что выбор метода подгонки импланта зависит от качества данных. Если данные относительно чистые, метод наименьших квадратов может быть простым и эффективным решением. В случае наличия шума предпочтительнее использовать RANSAC, так как он показывает лучшие результаты при работе с данными с выбросами. ICP может быть эффективным при точной начальной регистрации и отсутствии значительных дефектов в данных.

Литература

1. Clinical applications of three-dimensional printing in otolaryngology-head and neck surgery: a systematic review / C. J. Hong [et al.] // *Laryngoscope*. – 2019. – № 129 (9). – P. 2045–2052.
2. Линейные модели [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://scikit-learn.ru/stable/modules/linearmodel.html/>.
3. Osseointegration of novel titanium implant surfaces: A comparative in vivo study / M. Plecko [et al.] // *Acta Biomaterialia*. – 2012. – № 8 (9). – P. 3507–3514.
4. Automatic reconstruction of 3D cardiac anatomy and segmentation of cardiac MR images: a review / X. Zhuang [et al.] // *Physics in Medicine & Biology*. – 2010. – № 55 (20). – P. 71–98.

УДК 615.843

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОФОРЕЗА
ДЛЯ ДОСТАВКИ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ВЕЩЕСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ**

Франко Е. П.¹, Кудина А. В.¹, Друц Э. В.¹, Есьман Г. А.²

¹*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники*

²*Белорусский национальный технический университет*

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Электрофорез широко используется в медицинской практике для доставки лекарственных препаратов вглубь биологической ткани. Метод основан на воздействии электрического поля, которое способствует движению заряженных частиц лекарства через кожу. Однако данный процесс требует тщательной оптимизации для обеспечения максимальной эффективности. В статье рассматриваются способы математического моделирования, которые позволяют предсказать глубину и скорость проникновения лекарственных веществ, а также предложить пути оптимизации процесса.

Ключевые слова: электрофорез, лекарственный препарат, электропроводность, математическое моделирование.

**MODELING AND OPTIMIZATION OF ELECTROPHORESIS PROCESSES FOR DRUG DELIVERY
USING MATHEMATICAL METHODS**

Franko E.¹, Kudina A.¹, Druts E.¹, Esman G.²

¹*BelaRussian Federation State University of Informatics and Radioelectronics*

²*Belarusian National Technical University*

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Electrophoresis is widely used in medical practice to deliver drugs deep into biological tissue. The method is based on the effect of an electric field, which facilitates the movement of charged particles of the drug through the skin. However, this process requires careful optimization to ensure maximum efficiency. The article discusses the methods of mathematical modeling that allow us to predict the depth and rate of penetration of medicinal substances, as well as suggest ways to optimize the process.

Key words: electrophoresis, drug delivery, electrical conductivity, mathematical modeling.

Адрес для переписки: Друц Э. В., ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220089, Республика Беларусь

e-mail: e.druts@bsuir.by

Явление электрофореза широко используется в биологии и медицине. Метод электрофореза, например, применяется для выделения и анализа индивидуальных белков и нуклеиновых кислот, препаративного разделения и очистки различных веществ, постановки диагностических тестов, изучения подвижности клеток (чаще всего эритроцитов и лейкоцитов), исследования электрокинетических (электрохимических) свойств клеток, тканей и их поверхностей; большое диагностическое значение имеют электрофоретическое разделение ферментов на изоферменты и их количественная и качественная оценка; микроэлектрофорез является одним из основных современных методов в нейрофизиологических, нейрофармакологических и нейрхимических исследованиях [1].

Лекарственный электрофорез – это сочетание воздействия на организм постоянного электрического поля и вводимого с его помощью лекарственного вещества. При использовании данного метода к механизмам биологического действия постоянного тока добавляются лечебные эффекты от вводимого лекарственного препарата [2].

Лекарственный электрофорез не сводится к простой суммации эффектов гальванического тока и лекарственного вещества. В результате их

взаимодействия усиливается влияние каждого из указанных факторов, в результате этого наблюдается качественно новое воздействие. Ответная реакция зависит в первую очередь от фармакологических свойств лекарственного вещества [3].

К преимуществам лечебного электрофореза можно отнести следующие: введение малых, но достаточно эффективных доз действующего вещества; накопление вещества и создание депо (продолжительное действие); введение веществ в наиболее химически активной форме – в виде ионов; возможность создания высокой местной концентрации действующего вещества без насыщения им лимфы, крови и других сред организма; возможность введения вещества непосредственно в очаги воспаления, заблокированные в результате нарушения локальной микроциркуляции; положительное влияние слабого электрического тока на реактивность и иммунобиологический статус тканей.

Скорость движения лекарства через кожу в электрическом поле постоянного тока составляет около 1 см/ч. Следовательно, за время процедуры лекарственное вещество проникает на небольшую глубину, образуя депо в коже, частично в подкожной клетчатке [4]. Ткани человека и животных представляют собой весьма сложную и

разнородную систему, состоящую из белков и других полиэлектролитов, плохо проводящих электрический ток, а также растворов неорганических солей, имеющих относительно высокую электропроводность. Разные ткани содержат их в неодинаковых соотношениях, поэтому каждая из них обладает различными как диэлектрическими свойствами, так и электропроводностью. Электропроводность живых тканей прежде всего определяется концентрацией в них ионов и их подвижностью. В межклеточной жидкости, содержащей максимальное количество ионов, удельная электропроводность достаточно высока и составляет 1 См/м (Сименс на метр). Напротив, в цитозоле, содержащем органеллы и крупные макромолекулы, она понижается до 0,003 См/м. Вследствие различных причин удельная электропроводность целых органов и тканей существенно меньше, чем составляющих их компонентов. Наибольшие величины имеют жидкие среды организма (кровь, лимфа, желчь, моча, спинномозговая жидкость), а также мышечная ткань (0,2 См/м). Удельная электропроводность костной, жировой, нервной ткани, а в особенности грубоволокнистой соединительной ткани и зубной эмали значительно ниже (10^{-3} – 10^{-6} См/м) [2].

Электрический ток, преодолевая сопротивление кожи и подкожной жировой клетчатки, распространяется параллельными пучками через ткани по пути с наименьшим омическим сопротивлением. Электропроводность тканей организма может значительно варьироваться под влиянием различных внешних и внутренних факторов, в первую очередь изменяясь в зависимости факторов, влияющих на водно-солевое равновесие тканей [2].

Процесс проникновения лекарственного препарата через кожу можно описать при помощи уравнений фильтрации. Скорость проникновения жидкости в биологическую ткань можно выразить по формуле

$$\vartheta = -k \frac{\partial h}{\partial s}, \quad (1)$$

где k – коэффициент проникновения; h – напор лекарственного препарата, находящегося на расстоянии S от места начала проникновения; $\frac{\partial h}{\partial s}$ – градиент изменения напора препарата по направлению проникновения.

Поскольку человеческое тело имеет трехмерную структуру, необходимо учесть движение жидкости по трем осям координат:

$$\vartheta_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial s}, \vartheta_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial s}, \vartheta_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial s}, \quad (2)$$

Данная система уравнений позволяет определить необходимые параметры, описывающие проникновение лекарственного препарата в биологическую ткань [5].

Использование теплового воздействия также помогает улучшить проникновение препарата за счет уменьшения его вязкости:

$$\eta(T) = \eta_0 e^{-\alpha T}. \quad (3)$$

где η_0 – вязкость при комнатной температуре; α – температурный коэффициент, характеризующий, насколько сильно вязкость изменяется при изменении температуры; T – температура [4].

Для повышения эффективности электрофореза используются математические методы моделирования, позволяющие учесть такие параметры, как глубина проникновения препарата, электрическое сопротивление тканей, а также влияние тепла. Одним из важных аспектов является регулировка силы и частоты электрического тока в зависимости от особенностей тканей и состояния пациента.

Оптимизация процесса возможна благодаря применению численных методов, таких как метод конечных элементов, который позволяет рассчитывать распределение электрического поля в тканях и прогнозировать эффективность введения лекарств в зависимости от их физико-химических свойств и глубины расположения очага заболевания. Математическое моделирование помогает предсказать скорость диффузии препарата, его распределение в тканях и время достижения терапевтической концентрации в целевых зонах.

Литература

1. Улащик, В. С. Электрофорез лекарственных веществ : руководство для специалистов / В. С. Улащик. – Мн.: Беларус. навука, 2010. – 404 с.
2. Экспериментальные модели введения лекарственных препаратов методом электрофореза / Б. И. Леонов [и др.] // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. – 2016.
3. Оленев, Е. А. Моделирование биопроцессов и биотехнических систем: учеб. пособие / Е. А. Оленев, В. А. А. АльХайдри; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир: ВлГУ, 2021. – 156 с.
4. Аникин, А. И. Свойства газов. Свойства конденсированных систем: лабораторный практикум / А. И. Аникин; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М. В. Ломоносова. – Архангельск: САФУ, 2014. – 48 с.

УДК 621.315.592

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ УПАКОВКИ ГЛУБИННОГО ТОНКОГО СЛОЯ Si_xO_{1-x} НА ИЗМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ФОТО-ЭДС

Францкевич А. В., Францкевич Н. В., Мартинович В. А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Одна из технологий (TOPCon) по производству солнечных элементов активно развиваемых на сегодняшний день, это создание с тыльной стороны солнечного элемента пассивирующего отражающего слоя SiO_2 . В своих предыдущих исследованиях мы изучали возможность формирования структуры $Si/Si_xO_y/Si$ в результате геттерирования кислорода на слое предварительно созданных дефектов. Полученная структура может работать как отражающий слой в солнечном элементе при условии ее освещения не с лицевой, а с тыльной стороны. Пластины Cz-Si n-типа имплантировались водородом разными дозами, обрабатывались в DC плазме кислорода при $T = 350$ °C, и отжигались в вакууме при $T = 700$ °C. В результате формировалась островковая структура $Si/Si_xO_y/Si$. Размер островков и плотность их упаковки зависит от дозы предимплантированного водорода и условий плазменной обработки. Для полученных структур изучалась спектральная зависимость фото-ЭДС, при освещении образцов с лицевой и тыльной стороны. Полученные результаты показывают об изменении спектрального диапазона в котором регистрируется фото-ЭДС, в зависимости от дозы предимплантированного водорода, т.е. размера и плотности упаковки островков Si_xO_y

Ключевые слова: фото-ЭДС, островковковая структура Si_xO_y .

INFLUENCE OF PACKING DENSITY OF A DEEP THIN LAYER OF Si_xO_{1-x} ON THE CHANGE IN THE SPECTRAL DEPENDENCE OF PHOTOEMF

Frantskevich A., Frantskevich N., Martinovich V.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Annotation. One of the technologies for the production of solar cells actively developed today is the creation of a reflective layer of SiO_2 on the back side of the solar cell. In our previous studies, we studied the possibility of forming a $Si/Si_xO_y/Si$ structure as a result of oxygen gettering on a layer of pre-created defects. The resulting structure can work as a reflective layer in a solar cell, provided that it is illuminated not from the front, but from the back side. N-type Cz-Si wafers were implanted with hydrogen in different doses, processed in DC oxygen plasma at $T = 350$ °C, and annealed in vacuum at $T = 700$ °C. As a result, an island structure of $Si/Si_xO_y/Si$ was formed. The size of the islands and the density of their packing depend on the dose of pre-implanted hydrogen and the conditions of plasma treatment. For the obtained structures, the spectral dependence of the photo-EMF was studied when illuminating the samples from the front and back sides. The obtained results show a change in the spectral range in which photo-EMF is registered, depending on the size and packing density of Si_xO_y islands.

Keywords: photo-EMF, Si_xO_y island structure.

e-mail: frantskevichanatoli@gmail/com, n_frantskevich@bntu.by

Введение. Один из способов увеличения КПД солнечных элементов, который в настоящее время начинает активно использоваться в промышленной технологии (TOPCon) по их производству, это создание с тыльной стороны солнечного элемента пассивирующего отражающего слоя SiO_2 . На этот слой производится напыление алюминия, обеспечивающего задний контакт элемента. В дальнейшем, в слоях Al и SiO_2 , с целью возможностью сбора заряда, лазерным выжиганием прорезаются окна. Полученная структура позволяет расширить спектральный диапазон в котором происходит генерация носителей заряда, и позволяет уменьшить нагрев солнечного элемента

В своих предыдущих исследованиях [1–4] мы изучали возможность формирования островковой структуры $Si/Si_xO_y/Si$ или $Si/Si_xN_y/Si$ в результате геттерирования кислорода или азота на слое предварительно созданных дефектов. Полученная

структура может работать как отражающий слой в солнечном элементе при условии ее формирования с тыльной стороны пластины.

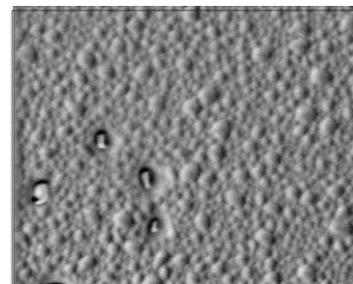


Рисунок 1 – Образ глубинного островкового слоя полученный в СЭМ в режиме поверхностно индуцированного потенциала от образца Si n-типа предварительно имплантированного водородом $E = 100$ keV, $D = 2 \cdot 10^{16}$ at./cm², обработанного в DC плазме кислорода и отожженного при 700 °C

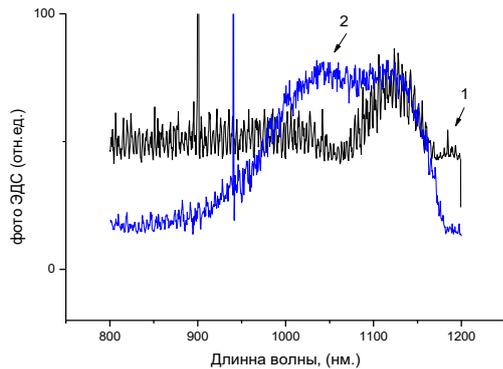


Рисунок 2 – Спектральная зависимость фото-ЭДС полученная при освещении образцов с лицевой стороны. Спектр 1 (черная линия) – исходный кремний, спектр 2 (синяя линия), от образца со сформированной островковой структурой Si_xO_y представленной на рисунке 1

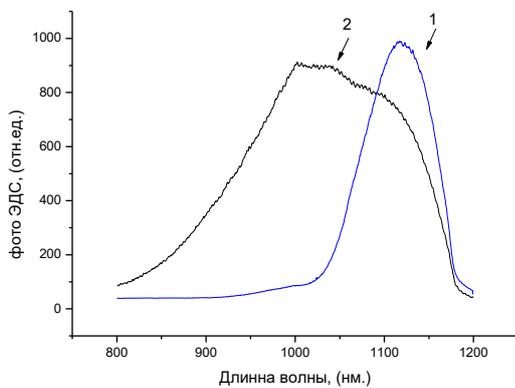


Рисунок 3 – Спектральная зависимость фото-ЭДС полученная при освещении образцов с тыльной стороны. Спектр 1 – исходный кремний, спектр 2 от образца со сформированной островковой структурой Si_xO_y представленной на рисунке 1

Эксперимент. Пластины Cz-Si *n*-типа имплантировались водородом разными дозами,

обрабатывались в DC плазме кислорода при $T = 350$ °С, и отжигались в вакууме при $T = 700$ °С. В результате формировалась островковая структура $\text{Si}\backslash\text{Si}_x\text{O}_y\backslash\text{Si}$. Размер островков и плотность их упаковки зависит от дозы предимплантированного водорода и условий плазменной обработки [1, 2]. Образ глубинного островкового слоя, полученный в СЭМ в режиме SEBIV, представлен на рисунке 1.

Для полученных структур изучалась спектральная зависимость фото-ЭДС, при освещении образцов с лицевой и тыльной стороны. Спектральная зависимость для образцов исходного кремния, и с островковой структурой Si_xO_y представленной на рисунке 1, при освещении лицевой стороны – на рисунке 1, спектры полученные при освещении тыльной стороны, представлены на рисунке 3.

Заключение. Измерение спектральной зависимости фото-ЭДС проводилось для образцов:

- исходного кремния;
- предварительно имплантированных водородом с энергией $E = 100$ keV и флюенсом $D = (1-40) \cdot 10^{15}$ at./cm²;
- имплантированных и обработанных в плазме кислорода при $T = 250$ и 350 °С;
- имплантированных, обработанных в плазме кислорода и отожженных при 700 °С.

Полученные результаты показывают, что изменение спектрального диапазона в котором регистрируется фото-ЭДС, наблюдается только для образцов прошедших следующие технологические этапы: имплантация, плазменная обработка, отжиг. При этом форма спектра фото-ЭДС зависит от дозы предимплантированного водорода, т. е. от размера и плотности упаковки островков Si_xO_y .

Литература

1. Frantskevich, A. V. // Mat. Scien. and Eng. B. – 2005. – V. 124, 125. – P. 341–344.
2. Frantskevich, N // Journal: Solid State Phenomena. – 2009. – V. 156, 158. – P. 91.
3. Frantskevich, A. V. // Vacuum. – 2009. – V. 83. – P. 107.
4. Францкевич, А. В. // Мат. 10-й межд. н.-т. конф. «Приборостроение-2017». – 2017. – С. 203–206.

УДК 621.315.592

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИН КРЕМНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБРАБОТКИ В DC ПЛАЗМЕ ВОДОРОДА: ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ**Францкевич А. В., Францкевич Н. В., Мартинович В. А.***Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Введение водорода в кремний – одна из технологических операций, позволяющая улучшить качество микроэлектронных структур. Однако, после введения водорода в зависимости от многих факторов в решетке Si могут возникать напряжения растяжения/сжатия, формироваться Si_xH_y комплексы. Методом комбинационного рассеяния (КР), регистрируя изменения локальных колебательных мод в спектральных диапазонах 521 ± 20 , 2100 ± 100 , 4161 ± 20 cm^{-1} , можно идентифицировать изменения, произошедшие с поверхностью Si. Пластины Cz-Si p-типа обрабатывались в DC плазме водорода при $U = 1, 2,5$ и 5 кВ, $T = 350$ °С, и изучались с использованием метода КР. Проведенные исследования позволили зафиксировать изменение интенсивности и местоположения линий в зависимости от условий плазменной обработки. Кроме этого, возможно, зарегистрирован сигнал от орто-пара молекулы водорода.

Ключевые слова: комбинационное рассеяние, дефекты в кремнии, водородная плазма.

SURFACE MODIFICATION OF SILICON WAFERS BY HYDROGEN DC PLASMA TREATMENT: A RAMAN STUDY**Frantskevich A., Frantskevich N., Martinovich V.***Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Annotation. Hydrogen introduction into silicon is one of the technological operations that improves the quality of microelectronic structures. However, after hydrogen introduction, depending on many factors, tensile/compressive stresses may arise in the Si lattice, and Si_xH_y complexes may form. Using the Raman scattering (RS) method, recording changes in local vibrational modes in the spectral ranges of 521 ± 20 , 2100 ± 100 , 4161 ± 20 cm^{-1} , it is possible to identify changes that have occurred with the Si surface. Cz-Si p-type wafers were processed in DC hydrogen plasma at $U = 1, 2.5, 5$ kV, $T = 350$ °C, and studied using the Raman method. The studies made it possible to record a change in the intensity and location of lines depending on the plasma processing conditions. In addition, a signal from an ortho-para hydrogen molecule may have been recorded.

Key words: Raman scattering, defects in silicon, hydrogen plasma.

e-mail: n_frantskevich@bntu.by

Введение. Водород (H_2) широко используется в технологии производства солнечных элементов, светодиодов, элементов памяти и других микроэлектронных структур на основе кремния с целью улучшения их качества. В отличие от исследований, направленных на изучение пассивацией водородом дефектов, главная тема проводимых исследований – управляемое развитие дефектов в объеме и на поверхности пластин кремния в присутствии водорода. Возможные области применения разрабатываемой технологии – снижение дозы имплантации в технологии Smart-Cut [1], создания вертикальных и поверхностных структур в кремниевой матрице [2]. Один из этапов проводимых исследований – изучить возможную модификацию поверхности пластин монокристаллического Cz-Si при введении в них ионов водорода из DC плазмы с разной энергией и при разных температурах.

После введения водорода в решетке Si могут возникать напряжения растяжения/сжатия, формироваться Si_xH_y и Si_xV_y комплексы, образовываться нанопузыри, содержащие водород [3–10]. Идентификация произошедших изменений в кристаллической решетке кремния возможна с использованием метода КР. В работах [11, 12] при-

ведены результаты исследований по изучению влияния доз имплантации, температуры и длительности водородных плазменных обработок, а также последующих отжига на интенсивность и местоположения линий LVM (local vibrational mod), ассоциируемых с водородной молекулой, локализованной в дефектах решетки кремниевой пластины, Si_xH_y группами и Si_xV_y комплексами.

Эксперимент. В стандартные пластины p-типа $12 \Omega\text{-cm}$ Cz-Si водород вводился из DC плазмы при 350 °С. Энергия ионов в процессе плазменной обработки составляла 5 (образец 1), $2,5$ (образец 2) или 1 кВ (образец 3). Длительность обработки составляла 60 минут при плотности тока $240, 120$ и $60 \mu A/cm^2$ для соответствующих энергий.

Спектры комбинационного рассеяния снимались при комнатной температуре с использованием газового Ar^+ лазера с длиной волны 488 nm и выходной мощностью 20 mW. Лазерный пучок фокусировался на исследуемых образцах с помощью микроскопа с увеличением $X100$. Регистрация сигнала производилась с использованием дифракционной решетки 1800 линий/мм и охлаждаемой CCD матрицы.

Результаты и дискуссия. Результат комбинационного рассеяния для образца 1 в спектральных диапазоне 450–650 cm^{-1} представлен на рисунке 1.

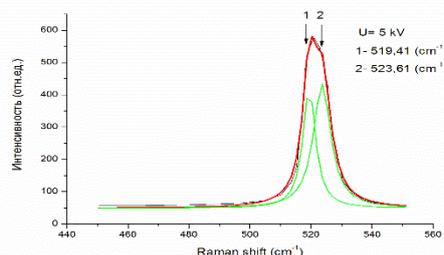


Рисунок 1 – Спектры комбинационного рассеяния от пластины Cz Si p-типа в спектральном диапазоне 450–650 cm^{-1} . Пластины обрабатывались DC плазмой водорода при 350 °C в течение 60 мин. Разность потенциалов и плотность тока составляла: $U = 5 \text{ kV}$, $j = 240 \text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (черная линия), $U = 2,5 \text{ kV}$, $j = 120 \text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (красная линия), $U = 1 \text{ kV}$, $j = 60 \text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (зеленая линия)

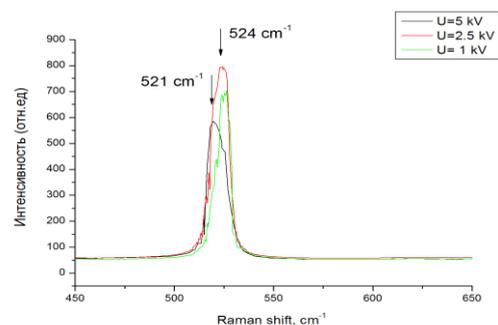


Рисунок 2 – Спектры КР от пластины Cz Si p-типа в спектральном диапазоне 450–650 cm^{-1} . Пластина обрабатывалась в DC плазме водорода при 350 °C в течение 60 мин. Разность потенциалов и плотность тока составляла $U = 5 \text{ kV}$, $j = 240 \text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Красная линия – данные КР, зеленые линии – результаты фитинга

Как видно из представленных данных, для образца 1, обработанного при максимальной разности потенциалов и наибольшей плотности тока, наблюдается минимальная интенсивность сигнала линии Si-Si, что является ожидаемым результатом. Для этого же образца интенсивность LVM, сопоставляемых сигналу от Si_xH_y комплексов, меньше, чем для образца 2, что является несколько «странным» результатом. Однако, этот

противоречивый результат легко объясняется, если предположить, что пассивации водородом дефектов, образовавшихся в результате плазменной обработки при данных условиях, не происходит. Более детальный анализ LVM, сопоставляемого Si-Si связям, и LVM, сопоставляемых H_2 молекуле локализованной в дефектах кремния, подтверждает высказанное предположение. Соответствующие результаты КР представлены на рисунке 2.

Как видно из данных, представленных на рисунке 2, сигнал КР раскладывается на две составляющие по формуле Лоренца с максимумами 519,4 и 523,01 cm^{-1} . С учетом того, что для исходного кремния регистрируются значение 521 cm^{-1} , полученный результат позволяет предположить, что в приповерхностном слое кремния после плазменной обработки сформировались области кремния, испытывающие растягивающие и сжимающие напряжения, т. е. дефектные области. Для образцов 2 и 3 так же наблюдаются как сжимающие, так и растягивающие напряжения. Только в отличие от образца 1, для них регистрируется LVM сопоставляемые SiH и H_2 .

Заключение. В пластины монокристаллического Si вводился водород из DC плазмы при разности потенциалов $U = 5, 2,5$ и 1 kV. Из полученных результатов исследований методом КР можно сделать вывод, что наиболее оптимальные условия введения водорода, является обработка в плазме при $U = 5 \text{ kV}$.

Литература

1. Bruel, M. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. – V. 108.
2. Frantskevich, N. // Journal: Solid State Phenomena. – 2009. – V. 156, 158. – P. 91.
3. Thierry de Vrijer // Vibr. Sp. – 2022. – V. 121. – P. 103387.
4. Zhang, X. // Nat Sci. – 2021. № 1:e. – P. 10002.
5. Ling, Z. // Jour. Mat. S. Chem. Eng. – 2013. – P. 1–14.
6. Woo Sik Yoo // J. Micro/Nanolith. MEMS MOEM. – 2014. – № 13 (1). – P. 011205.
7. Volodin, V. // APL. – 0003-6951/98/73(9)/1212.
8. Dong, X. // J. Phys.: Condens. Matter. – 2020. – V. 32.
9. Mews, M. // Energy Procedia. – 2014. – V. 55. – P. 827 – 833.
10. Nazarov, A. // Sem. Ph., QElectronics & Optoelectronics. – 2008. – V. 11, № 2. – P. 101–123.
11. Terreault, B. // Physica status solidi (a). – 2007. – V. 204. – P. 2129.
12. Ilisca, E. // Hydrogen. – 2021. – № 2.

УДК517.3+004

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ WOLFRAMMATHEMATICA ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ ИНТЕГРАЛОВ

Чернявская С. В., Гундина М. А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной статье рассматривается реализация некоторых встроенных возможностей компьютерной системы Wolfram Mathematica для решения интегралов. Раздел «Криволинейные интегралы» является одним из основных в курсе «Математика» для изучения студентами второго, порой трудно поддающимся для глубокого усвоения и понимания изучаемого материала.

Ключевые слова: криволинейный интеграл, компьютерная система Wolfram Mathematica.

APPLICATION WOLFRAM MATHEMATICA COMPUTER SYSTEM TO FIND INTEGRALS Cherniavskaja S., Hundzina M.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. This article discusses the implementation of some of the built-in possibilities of the Wolfram Mathematica computer system for solving integrals. The section “Line integrals” is one of the main ones in the “Mathematics” for students to study, which is sometimes difficult for deep assimilation and understanding of the material being studied.

Key words: line integral, computer system Wolfram Mathematica.

Адрес для переписки: Гундина М. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: hundzina@bntu.by

Раздел «Криволинейные интегралы» является одним из сложных для изучения разделов по дисциплине «Математика» для студентов второго курса технических университетов.

Известно, что криволинейные интегралы имеют многочисленные приложения в геометрии, механике и различных областях инженерного дела. Так, с их помощью можно вычислить длину кривой, статические моменты, координаты центра тяжести, площади плоских фигур и цилиндрических поверхностей, работу переменной силы и многие другие важные характеристики процессов, анализируемых в инженерии.

Для решения некоторых задач данной тематики можно использовать WolframCloud.

WolframCloud сочетает в себе современный блокнотный интерфейс с самым продуктивным в мире языком программирования, пригодным для разработки программ от маленьких до самых больших, с непосредственным глубоким доступом к встроенным алгоритмам и знаниям. Изначально работая на языке Wolfram Language, WolframCloud делает каждый аспект облачных операций программируемым, внося беспрецедентный уровень интеграции, гибкости, простоты и предоставляемых возможностей в новое поколение облачных технологий [1].

Для демонстрации некоторых возможностей этого программного продукта, рассмотрим решение следующих задач с применением компьютерной системы Wolfram Mathematica:

Задача 1. Вычислить криволинейный интеграл $\int_L xy dl$ по дуге окружности $x(t) = \cos t$, $y(t) = \sin t$ при изменении параметра $\frac{\pi}{2} \leq t \leq \pi$.

Решение. Команда для вычисления данного интеграла может быть представлена спомощью приложения языка Wolfram, которое специализировано для программирования и разработки облачных программ (рисунок 1).

```
LineIntegrate[xy, {x, y} ∈ Circle[{0, 0}, 1, {Pi/2, Pi}]]
1
-2
```

Рисунок 1 – Команда для вычисления криволинейного интеграла первого рода

Задача 2. Вычислить длину дуги кубической параболы $y = \frac{x^3}{4}$ между точками абсциссами 1 и 2.

Решение. Для вычисления длины дуги можно воспользоваться следующей командой, представленной на рисунке 2:

```
f[x_] := x^3/4
Plot[f[x], {x, 1, 2}]
|график функции
ArcLength[f[x], {x, 1.0, 2}]
|длина дуги
```

Рисунок 2 – Команды для нахождения длины дуги в декартовой системе координат

График подынтегральной функции представлен на рисунке 3.

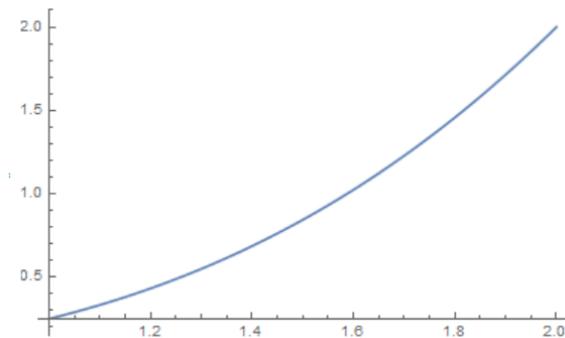


Рисунок 3 – График подынтегральной функции в декартовой системе координат

Можно вычислить длину дуги кривой, заданной не только в декартовых координатах, но и параметрически или в полярной системе координат. Например, для вычисления длины дуги для функции $\begin{cases} x = \sin t \\ y = \cos t \end{cases}$ заданной параметрически, воспользуемся командой, представленной на рисунке 4.

```
ArcLength[{Sin[θ], Cos[θ]}, {θ, 0, 2 Pi}]
```

длина дуги | синус | косинус | число

Рисунок 4 – Команда для вычисления длины дуги для функции, заданной параметрически

Подключая опцию «Polar», можно получить возможность вычислить интеграл для участка кривой, заданной в полярной системе координат (рисунок 5).

```
ArcLength[{Sin[fi], fi}, {fi, 0, 2 Pi}, "Polar"]
```

длина дуги | синус | число пи

2 π

Рисунок 5 – Команда для вычисления длины дуги для функции, заданной в полярной системе координат

Рассмотрим вычисление криволинейного интеграла второго рода или криволинейного интеграла по координатам.

Задача 3. Вычислить криволинейный интеграл $\int_L \frac{y-1}{x} dx + \frac{x+1}{y} dy$, где L – это отрезок прямой от точки $A(1;1)$ до точки $B(3;2)$.

Решение. Воспользуемся командой, представленной на рисунке 6:

```
f = {(y-1)/x, (x+1)/y};
reg = Line[{{1, 1}, {3, 2}}];
LineIntegrate[f, {x, y} ∈ reg]
3 - Log[3]
2
```

Рисунок 6 – Команда для вычисления криволинейного интеграла второго рода

Решим задачу на вычисление криволинейного интеграла второго рода в трехмерном пространстве.

Задача 4. Вычислить криволинейный интеграл $\int_L y^2 dx + (x^2 + z)dy + (x + y + z^2)dz$, где L – отрезок прямой в пространстве от точки $A(1,0,2)$ до точки $B(3,1,4)$.

Решение. Воспользуемся командой, представленной на рисунке 7:

```
f = {y^2, x^2+z, x+y+z^2};
reg = Line[{{1, 0, 2}, {3, 1, 4}}];
LineIntegrate[f, {x, y, z} ∈ reg]
95
3
```

Рисунок 7 – Команда для вычисления криволинейного интеграла второго рода

При изучении темы «Векторные поля» представляется интересной возможность визуализации векторного поля. Такая возможность также предусмотрена в компьютерной системе Wolfram Mathematica.

Основным преимуществом использования применяемых технологий являются непрерывность и доступность обучения в любом месте и в любое время. Взаимодействие преподавателей, студентов реализуется с помощью любого устройства (компьютер, планшет, мобильный телефон и т. п.), на котором установлен браузер с возможностью подключения к сети Интернет. Любой студент может начать выполнять задание в аудитории, а продолжить работу дома без необходимости копирования части выполненного задания на любой носитель информации благодаря тому, что вся необходимая информация сохранена в облаке (центре обработки информации) на удаленном сервере.

Литература

1. О WolframCloud [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.wolfram.com/cloud/index.php.ru?source=footer>.

УДК 62-233.3/9

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ 3-D ПЕЧАТИ ДЛЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ УЗЛОВ ПЕЧАТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Шевель Н. А.^{1,2}, Бурак В. А.¹

¹Белорусский национальный технический университет

²РУП «Издательство Белорусский «Дом Печати»»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе рассматривается применение 3D-печати для модернизации и поддержания работоспособности устаревшего полиграфического оборудования. Особое внимание уделяется работе углового фитинга подачи вакуума, пришедшего в негодность из-за вибрационной нагрузки, возникающей при перемещении листа со штабелера на стол подачи. Использование PET-G пластика для изготовления при помощи 3D-печати нового переходника системы пневматического перемещения листа продемонстрировало устойчивость к внешним воздействиям и возможность интеграции быстросъемных элементов печатной машины.

Ключевые слова: печатное оборудование, полиграфические машины, полимерные материалы, пневматика.

POSSIBILITIES OF APPLICATION OF 3-D PRINTING TECHNOLOGY FOR PNEUMATIC UNITS OF PRINTING EQUIPMENT

Shevel N.^{1,2}, Burak V.¹

¹Belarusian National Technical University

²Republican unitary enterprise «PUBLISHING HOUSE «Belarusian Printing House»

Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The paper considers the use of 3D-printing for upgrading and maintaining the functionality of obsolete printing equipment. Particular attention is paid to the operation of the corner fitting for vacuum supply, which has become unusable due to the vibration load that occurs when moving the sheet from the stacker to the feed table. The use of PET-G plastic for the manufacture of a new adapter for the pneumatic sheet handling system using 3D-printing demonstrated resistance to external influences and the possibility of integrating quick-release elements of the printing machine.

Keywords: printing equipment, printing machines, polymeric materials, pneumatics.

Адрес для переписки: Шевель Н. А., пр. Независимости 79/1, г. Минск 220005, Республика Беларусь
e-mail: shevel48@gmail.com

На сегодняшний день использование пневматики в полиграфическом производстве играет ключевую роль в обеспечении эффективного и качественного изготовления печатной продукции. Пневматические системы, которые включают в себя регулировку валов и подачу листов с помощью пневмоцилиндров и пневмоклапанов, являются неотъемлемой частью производственного процесса. Эти системы обеспечивают точность и надежность, что особенно важно в условиях высокой конкуренции и стремления к совершенству в полиграфии. Без них невозможно представить современное производство, где каждая деталь и каждый элемент должны работать слаженно и без сбоев, чтобы удовлетворять растущие требования клиентов и рынка.

Однако, как и любое оборудование, пневматические системы подвержены износу. Со временем старые узлы выходят из строя, и их замена становится необходимостью. В условиях, когда приобретение аналогов затруднено или невозможно, так как фирмы производители печатного оборудования сконцентрированы в европейских странах и введены санкции по поставкам полиграфического оборудования и запасных частей, на по-

мощь приходит 3D-печать. Эта технология открывает новые горизонты для производства, позволяя создавать уникальные детали и компоненты, которые полностью соответствуют требованиям конкретного оборудования. 3D-печать не только ускоряет процесс создания необходимых деталей, но и позволяет значительно сократить затраты на производство, что особенно важно для предприятий, стремящихся оптимизировать свои ресурсы.

Рассмотрим это на примере печатной машины Man Miller, выпущенной в 1987 году. Эта машина служила верой и правдой на протяжении многих лет, но, как и любое оборудование, со временем потребовала замены некоторых компонентов. Одним из таких компонентов стал угловой фитинг (переходник) подачи вакуума для секции самонаклада, который пришел в негодность из-за постоянной вибрационной нагрузки при подаче бумаги. Вибрации, возникающие при работе машины, постепенно разрушали фитинг, что приводило к утечкам и снижению эффективности всей системы. Для устранения этой проблемы были заменены демпфирующие элементы, которые связаны с подающим бумагу столом, где

непосредственно находится пневматическая система. Что позволило значительно снизить вибрации и продлить срок службы новых компонентов. Это решение не только восстановило функциональность машины, но и улучшило ее производительность.

Для решения проблемы с фитингом был разработан переходник с использованием системы автоматизированного проектирования Компас 3D и изготовлен на базе полимерного материала посредством 3D-печати (рисунок).

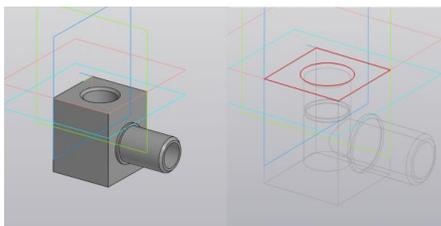


Рисунок – Модель фитинга

В процессе проектирования был выбран PET-G пластик, который продемонстрировал высокую устойчивость к обработке резанием, таким как сверление и нарезание резьбы. В отличие от ABS пластика, который при механической обработке проявляет более «мягкую» структуру, затрудняющую создание прочных соединений и подверженную быстрому износу, PET-G пластик обладает высокой прочностью и долговечностью. Эти свойства делают его идеальным выбором для изготовления компонентов, рассчитанных на значительные нагрузки, возникающие при работе с избыточными давлениями, способных выдерживать циклические нагрузки без появления трещин. Использование PET-G позволило интегрировать быстросъемные элементы с цанговым зажимом и внешней резьбой, что существенно упростило процесс монтажа и демонтажа, а также сократило время на обслуживание и замену деталей.

Изначально возникли сомнения относительно герметичности и надежности нового переходника, полученного при помощи 3D-печати, особенно в сравнении с традиционными металлическими элементами вакуумной системы. Однако проведенные исследования с применением таких способов обеспечения герметичности стыкуемых частей оборудования, как уплотнение металлического выхода воздухопровода с помощью фумленты, запрессовку переходника с фиксацией на герметик и установку армированного пневмошланга с использованием хомута с другой стороны, показали, что новый полимерный переходник полностью совместим с металлическими компонентами. Это обеспечило надежное и герметичное соединение. Таким образом, можно утверждать, что современные полимерные материалы могут успешно конкурировать с металлами

в определенных применениях, предлагая при этом дополнительные преимущества, такие как легкость и устойчивость к коррозии. Выбор правильного материала для 3D-печати является крайне важным моментом, так как от этого напрямую зависят эксплуатационные свойства и надежность изготавливаемых деталей.

Для зубчатых передач, например, необходим материал с высокими показателями прочности, твердости и износостойкости. Хорошим выбором здесь могут быть такие пластики, как ABS, PETG или некоторые виды ПА (нейлона). Эти материалы обеспечивают требуемую прочность и сопротивление истиранию, что критично для корректной работы зубчатого зацепления.

Для пневматических компонентов, как рассматриваемые в работе фитинги печатных машин, напротив, более важны гибкость, эластичность и устойчивость к перепадам давления. В этом случае подойдут более мягкие пластики, например, TPU или гибкие виды ПЛА. Они способны выдерживать деформации и вибрации без разрушения, что крайне важно для герметичности и надежной работы пневматических узлов.

Успешная интеграция современных технологий 3D-печати в процесс поддержания и модернизации устаревшего печатного оборудования позволяет не только решать проблемы износа и отсутствия запасных частей, но и открывает новые возможности для повышения эффективности и надежности производственных процессов. Использование PET-G пластика в качестве материала для изготовления компонентов демонстрирует инновационный подход к решению технических задач, обеспечивая долговечность и адаптивность к изменяющимся условиям эксплуатации. Этот подход может быть применен и в других отраслях, где требуется быстрое и экономичное решение для замены изношенных деталей.

Таким образом, 3D-печать становится важным инструментом в арсенале полиграфического производства, позволяя не только поддерживать работоспособность старого оборудования, но и модернизировать его, повышая эффективность и надежность. В условиях быстро меняющегося рынка и технологического прогресса, такие инновационные подходы обеспечивают предприятиям конкурентное преимущество и устойчивость в долгосрочной перспективе. Это подчеркивает важность постоянного внедрения новых технологий, их интеграции и адаптации к изменяющимся условиям, что является ключом к успеху в современном бизнесе.

Литература

1. Петрюк, И. П. Материаловедение. Полимерные материалы и композиты: учеб. пособие: Ч. 1 / И. П. Петрюк; ВолгГТУ. – Волгоград: ВолгГТУ, 2011. – 68 с.

УДК 535.37;620.3

АП-КОНВЕРСИОННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ НАНОКРИСТАЛЛОВ АЛЮМИНАТА ГАДОЛИНИЯ, АКТИВИРОВАННОГО ИОНАМИ ИТТЕРБИЯ И ЕВРОПИЯ

Юмашев К. В.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследована ап-конверсионная люминесценция нанокристаллов алюмината гадолия, активированного ионами европия и иттербия, в видимой области спектра. Предложен механизм наблюдаемой ап-конверсионной люминесценции, предполагающий вовлечение двух фотонов в данный процесс. Определены эффективность и скорость переноса энергии от ионов иттербия к ионам европия.

Ключевые слова: нанокристаллы, ионы европия и иттербия, ап-конверсионная люминесценция, перенос энергии.

AP-CONVERSION LUMINESCENCE OF GADOLINIUM ALUMINATE NANOCRYSTALS DOPED WITH YTTERBIUM AND EUROPIUM IONS

Yumashev K.

Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The up-conversion luminescence of gadolinium aluminate nanocrystals doped with europium and ytterbium ions was studied in the visible spectrum region. A mechanism for the observed up-conversion luminescence has been proposed, suggesting the involvement of two photons in this process. The efficiency and rate of energy transfer from ytterbium to europium ions were determined.

Key words: nanocrystals, europium and ytterbium ions, up-conversion luminescence, energy transfer.

Адрес для переписки: Юмашев К. В., пр. Независимости, 65/17, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: kyumashev@bntu.by

В настоящей работе представлены результаты исследования ап-конверсионной люминесценции нанокристаллов алюмината гадолия, активированного ионами иттербия и европия (Yb, Eu: GdAlO₃). Данный европий-содержащий материал является перспективной средой для люминофоров, излучающих в красной области спектра.

На рисунке 1 представлен спектр ап-конверсионной люминесценции образца Yb, Eu: GdAlO₃ в видимой области спектра. Возбуждение осуществлялось в полосу поглощения ${}^2F_{7/2} \rightarrow {}^2F_{5/2}$ ионов иттербия Yb³⁺ на длине волны 960 нм (волновое число 10417 см⁻¹) излучением лазерного диода InGaAs. Наблюдаемые полосы люминесценции связаны с переходами из метастабильного возбужденного состояния 5D_0 в состояния 7F_J ($J = 0, 1, 2, 3, 4$) иона европия Eu³⁺. Полосы при 17390 см⁻¹ (575 нм), 16950 см⁻¹ (590 нм), 16210 см⁻¹ (617 нм), 15385 см⁻¹ (650 нм), 14490 см⁻¹ (690 нм) относятся к переходам ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_0$, ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$, ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$, ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_3$, ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_4$, соответственно. Переход ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_0$ запрещен правилами отбора, и эта полоса крайне слаба. Полоса ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$ содержит два локальных пика при 17007 см⁻¹ (588,0 нм) и 16842 см⁻¹ (593,8 нм). Для полосы ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ наблюдаются два локальных пика при 16353 см⁻¹ (611,5 нм), 16042 см⁻¹ (623,4 нм). Для полосы ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_3$ наблюдается пик при 15352 см⁻¹ (651,4 нм) и слабовыраженное плечо при 15453 см⁻¹ (647,1 нм). Полоса ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_4$ расщепляется на три локальных пика при 14735 см⁻¹ (678,7 нм), 14485 см⁻¹ (690,4 нм) и 14269 см⁻¹ (700,8 нм).

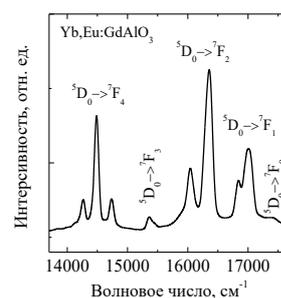


Рисунок 1 – Спектр ап-конверсионной люминесценции образца Yb, Eu: GdAlO₃ при возбуждении излучением с длиной волны 960 нм (волновое число 10417 см⁻¹)

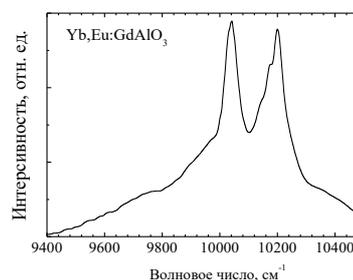


Рисунок 2 – Спектр люминесценции образца Yb, Eu: GdAlO₃ в ближнем ИК-диапазоне (переход ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$ иона Yb³⁺). Длина волны возбуждения 960 нм (волновое число 10417 см⁻¹)

На рисунке 2 приведен спектр люминесценции ионов иттербия Yb³⁺ (переход ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$) для образца Yb, Eu: GdAlO₃ (длина волны возбужде-

ние 960 нм). Люминесценция наблюдается в спектральной области 9400–10500 см⁻¹ (952–1064 нм), в которой доминируют два интенсивных пика при 10141,6 см⁻¹ (995,9 нм) и 10198,9 см⁻¹ (980,5 нм).

Наблюдаемый ап-конверсионный процесс можно описать с помощью схемы, приведенной на рисунке 3.

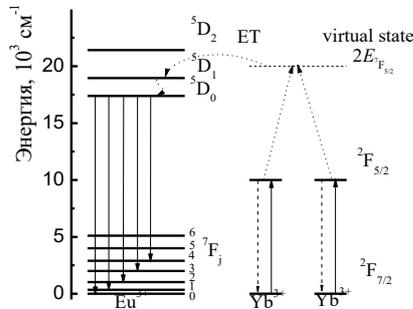


Рисунок 3 – Схема уровней энергии ионов Eu³⁺ и Yb³⁺ с указанием люминесцентных переходов и ⁵D₀→⁷F_J иона Eu³⁺ и предложенного механизма переноса энергии Yb³⁺→Eu³⁺ в образце Yb:Eu:GdAlO₃

Энергия возбужденного состояния ²F_{5/2} иона иттербия Yb³⁺ примерно в два раза меньше энергии метастабильного состояния ⁵D₀ иона европия Eu³⁺. Вследствие этого прямой перенос энергии (ЕТ) от ионов иттербия к ионам европия происходить не может. Однако в образце Yb:Eu:GdAlO₃ два близко расположенных иона Yb³⁺ могут образовать пару с «виртуальным» возбужденным уровнем энергии. Энергия этого уровня энергии будет равна удвоенной энергии состояния ²F_{5/2} иона иттербия, что близко к энергии ⁵D₁ состояния иона европия Eu³⁺. Таким образом, становится возможным кооперативный перенос энергии от возбужденной пары ионов иттербия Yb³⁺ к одному иону европия Eu³⁺. За этим процессом следует быстрая безызлучательная релаксация в метастабильное состояние ⁵D₀ иона европия, из которого в дальнейшем происходят излучательные переходы в состояния ⁷F_J (J = 0, 1, 2, 3, 4), приводящие к наблюдаемой ап-конверсионной люминесценции.

Эффективность η_{ЕТ} кооперативного переноса энергии Yb³⁺ → Eu³⁺ можно определить с помощью выражения [1]

$$\eta_{ET} = 1 - \frac{\tau_{Yb, Eu}}{\tau_{Yb}}, \quad (1)$$

где τ_{Yb} – время жизни в возбужденном состоянии ионов иттербия Yb³⁺ для образца, активированного только ионами Yb³⁺, а τ_{Yb, Eu} – время жизни в возбужденном состоянии ионов Yb³⁺ для образца, со-активированного ионами иттербия Yb³⁺ и европия Eu³⁺. В рассматриваемом случае ионы иттербия выступают в качестве ионов-доноров, передающих энергию ионам европия (ионам-акцепторам). Времена жизни τ_{Yb} и τ_{Yb, Eu} определялись путем

измерения кинетики затухания люминесценции ионов иттербия для соответствующих образцов.

На рисунке 4 приведена кинетика затухания люминесценции иона Yb³⁺ (переход ²F_{5/2}→²F_{7/2}) для образцов Yb:GdAlO₃ и Yb:Eu:GdAlO₃. Возбуждение люминесценции производилось на длине волны 960 нм (волновое число 10417 см⁻¹), а регистрация – на длине волны 995 нм (волновое число 10050 см⁻¹). Для обоих образцов кинетика затухания люминесценции не является моноэкспоненциальной и может быть описана двухэкспоненциальной функцией

$$I(t) = I_1(t) + I_2(t) = I_{10}\exp(-t/\tau_1) + I_{20}\exp(-t/\tau_2),$$

где I(t) – интенсивность люминесценции.

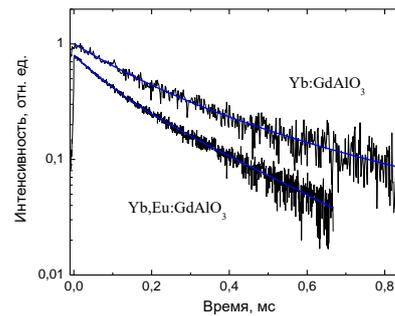


Рисунок 4 – Кинетика затухания люминесценции иона Yb³⁺ (переход ²F_{5/2}→²F_{7/2}) на длине волны 995 нм (волновое число 10050 см⁻¹) для образцов Yb:GdAlO₃ и Yb:Eu:GdAlO₃. Длина волны возбуждения 960 нм (волновое число 10417 см⁻¹). Сплошные линии – аппроксимация экспериментальных данных двухэкспоненциальной функцией с помощью метода наименьших квадратов. Коэффициент детерминации R² = 0,9778 (Yb: GdAlO₃) и 0,9957 (Yb, Eu: GdAlO₃)

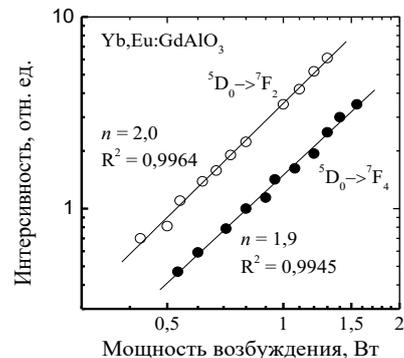


Рисунок 5 – Зависимость интенсивности ап-конверсионной ⁵D₀→⁷F₂ и ⁵D₀→⁷F₄ люминесценции ионов Eu³⁺ от мощности возбуждения (в логарифмическом масштабе) для образца Yb:Eu:GdAlO₃. Длина волны возбуждения 960 нм (волновое число 10417 см⁻¹). Точки – экспериментальные данные, линии – аппроксимация экспериментальных зависимостей функцией I_{UCL} ~ Pⁿ

Для образца Yb:GdAlO₃ времена быстрой и медленной компонент затухания составляют (τ_{Yb})₁ = 0,14 мс и (τ_{Yb})₂ = 0,41 мс. Для образца Yb, Eu:GdAlO₃ времена затухания (τ_{Yb, Eu})₁ = 0,090 мс и

$(\tau_{Yb, Eu})_2 = 0,30$ мс. Относительный вклад быстрой компоненты затухания в общий общую интенсивность люминесценции $[\int I_1(t)dt / \int I(t)dt] = I_{10}\tau_1 / (I_{10}\tau_1 + I_{20}\tau_2)$ составляет 26,5 % (Yb:GdAlO₃) и 22,0 % (Yb, Eu:GdAlO₃). Быструю компоненту τ_1 затухания можно связать с ионами иттербия, находящимися в аморфной фазе и дефектах кристаллической решетки, а медленную компоненту τ_2 затухания отнести к ионам иттербия в нанокристаллах GdAlO₃. Если для оценки эффективности η_{ET} переноса энергии в выражении (1) использовать значения медленных компонент затухания люминесценции, то получаем $\eta_{ET} = 27$ %. Если же использовать значения средних времен затухания люминесценции $(\tau_{Yb})_{cp} = 0,255$ мс $(\tau_{Yb, Eu})_{cp} = 0,183$, то эффективность $\eta_{ET} = 28$ % (средние значения средних времен затухания, исходя из математического определения среднего значения функции, определяются по формуле $\tau_{cp} = \int I(t)dt / \int I(t)dt$). Видно, что получаемые значения эффективности η_{ET} переноса энергии очень близки (27 % и 28 %). При этом скорость переноса энергии $Yb^{3+} \rightarrow Eu^{3+}$, которая может быть оценена как $p_{ET} = \frac{1}{\tau_{Yb, Eu}} - \frac{1}{\tau_{Yb}}$, составляет 0,9 мс⁻¹ в первом случае и 1,5 мс⁻¹ – во втором случае.

Предложенный выше механизм ап-конверсионной люминесценции подтверждается полученной зависимостью интегральной интенсивности I_{UCL} ап-конверсионной люминесценции ионов европия Eu^{3+} от мощности возбуждения P ионов иттербия (рисунок 5). Возбуждение люминесценции осуществлялось на длине волны 960 нм (волновое число 10417 см⁻¹), а регистрация – в спектральных диапазонах, соответствующим переходам $^5D_0 \rightarrow ^7F_2$ и $^5D_0 \rightarrow ^7F_4$ ионов европия (рисунок 1). Из данных рис. 5 следует, что $I_{UCL} \sim P^n$, где $n = 2,0$ для люминесценции на переходе $^5D_0 \rightarrow ^7F_2$ и $n = 1,9$ для $^5D_0 \rightarrow ^7F_4$ люминесценции. Это свидетельствует о том, что в процесс возбуждения ап-конверсионной люминесценции ионов европия вовлечены два фотона, то есть, подтверждая тем самым двухфотонный механизм возбуждения данной люминесценции [2].

Литература

1. Energy transfer and enhanced 1.54 μm emission in Erbium-Ytterbium disilicate thin films / M. Miritello [et al.] // Optics Express. – 2011. – V. 19 (21). – P. 20761–20772.
2. Power dependence of upconversion luminescence in lanthanide and transition-metal-ion systems / M. Pollnau [et al.] // Phys. Rev. B. – 2000. – V. 61 (5). – P. 3337–3346.

УДК 681+004

ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИНОРМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВЫБОРКИ

Юхновская О. В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассматривается вопрос применения мультиномального распределения для выявления аномальных значений. Сформулирован критерий определения значения как аномального.

Ключевые слова: аномальные значения, бинаризация, компьютерная система Wolfram Mathematica.

APPLICATION OF MULTINORMAL DISTRIBUTION FOR DETECTION ABNORMAL SAMLE VALUES

Yuhnovskaya O.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The issue of using multinormal distribution to identify anomalous values is considered. A criterion for determining a value as anomalous is formulated.

Key words: anomalous values, binarization, computer system Wolfram Mathematica.

*Адрес для переписки: Юхновская О. В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: yuhnovskaja@bntu.by*

В современных условиях широкого распространения информационных технологий с каждым днем все более актуальным становится использование технологий автоматического распознавания текста на изображениях, таких как, например, обработка результатов анкетирования, перевод изображений страниц книги в текст, который может подвергаться дальнейшей обработке.

Данные технологии обработки и распознавания рукописного текста являются актуальными и вос-

требованными в различных сферах деятельности, а разработка методов и алгоритмов распознавания ранее написанного рукописного текста позволит повысить эффективность работы таких систем. Однако и полученный после работы алгоритма результат может содержать аномальные значения, которые также необходимо выявлять. Анализ ряда литературных источников [1–4] позволяет сделать вывод о том, под аномальными значениями при измерениях можно понимать отклонение результатов измерения

от ожидаемых значений, соответствующих паспортным данным измерительных приборов и измеряемым параметрам объекта.

Для выявления аномальных значений выборки может быть использована мультипликативная модель, а именно двумерное нормальное распределение с коэффициентами значимости.

Мультипликативная модель определения аномальных значений основана на применении плотности мультиформального распределения. Вначале вычисляются числовые характеристики выборки значений признаков, затем строится соответствующая плотность распределения и применяется условие определения аномального значения.

Рассмотрим вначале одномерный случай. Нормальное распределение – это один из типов непрерывного распределения вероятностей для вещественной случайной величины.

Пусть нормально распределенная случайная величина с математическим ожиданием μ и дисперсией σ^2 .

$$X \sim N(\mu, \sigma^2).$$

В двумерном случае, если случайные величины X , Y независимы, плотность распределения может быть найдена по формуле:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2}.$$

Также этот случай можно и далее распространить на m -мерное пространство признаков.

Предположим, что в рассматриваемом наборе данных был только один признак, и этот признак имел нормальное распределение, тогда можно построить алгоритм обнаружения аномалий, используя функцию $f(x)$. Также можно установить некоторое пороговое значение ε , которое будет определять, является ли случай аномальным или нет. Значение ε следует задавать эвристически, и его значение будет зависеть от варианта использования и предпочтительной чувствительности к аномалиям в каждом определенном эксперименте.

Пусть обучающий набор с m элементами (x^1, x^2, \dots, x^m) , где x^i является n -мерным вектором в общем случае, верхний индекс обозначает номер рассматриваемого признака.

Для каждого признака x^i вычислим параметры μ и σ^2 .

$$(\mu^1, \mu^2, \dots, \mu^m), (\sigma^{2^1}, \sigma^{2^2}, \dots, \sigma^{2^m}),$$

где

$$\mu^i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k^i,$$

$$\sigma^{2^i} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_k^i - \mu^i)^2,$$

верхние индексы i – номер элемента выборки; j – номер признака.

Поскольку параметры являются независимыми, то умножая f^i можно построить функцию правдоподобия:

$$f(x^1, \dots, x^m) = f(\mu^1, \sigma^{2^1}) \dots f(\mu^m, \sigma^{2^m}).$$

По этой формуле определяется вероятность того, что этот новый элемент является аномальным. Теперь, когда получено значение функции f , проверяем меньше ли оно значения ε .

Условия определения аномального значения:

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } f < \varepsilon \\ 0, & \text{если } f \geq \varepsilon \end{cases}$$

Важным является замечание, что если значение является аномальным по некоторому единичному признаку x^i , не означает, что данное значение будет аномальным при учете всех признаков.

Под коэффициентом весомости свойства x^i будем понимать количественную характеристику важности и значимости данного признака среди других свойств. Количественное выражение будет приниматься в процентах либо долях единицы.

В связи с существенным влиянием параметров весомости на результаты оценки или возможности их определение следует проводить одновременно несколькими методами. Сравнение полученных таким образом результатов позволит увеличить объективность выводов.

Пусть вектор (G^1, G^2, \dots, G^m) нормированных коэффициентов весомости. Чем ближе коэффициент к 1, тем наблюдается большая значимость данного признака.

При рассмотрении аддитивных моделей рассматривается средневзвешенная вида

$$X_{0i} = \sum_{k=1}^m G^k \times x^i.$$

Чувствительность средневзвешенной арифметической комплексной оценки является постоянной величиной. Поэтому изменение любого, даже важнейшего показателя при большом числе единичных показателей не оказывает существенного влияния на комплексную оценку. Это может привести к тому, что при выходе значения какого-либо единичного показателя за предельно допустимое значение, комплексная оценка качества останется высокой за счет остальных показателей.

В случае двумерного нормального распределения будем использовать средневзвешенную мультипликативного вида, определяемую по следующей формуле:

$$X_{0i} = \sum_{k=1}^m (x^i)^{G^k},$$

где элементы вектора G выступают в роли степеней множителей.

В отличие от средневзвешенной арифметической, чувствительность средневзвешенной геометрической зависимости комплексной оценки к

изменению единичных оценок очень высокая; благодаря этому малые значения одних показателей не могут быть перекрыты высокими значениями других показателей качества.

Литература

1. Подстригаев, А. С. Классификация и способы устранения аномальных ошибок измерения частотно-временных параметров сигналов в широкополосных приемниках / А.С. Подстригаев // Журнал Сиб. фед. университета. Техника и технологии. – 2022. – № 15 (2). – С. 223–237.
2. Dunning, T. Practical Machine Learning: A New Look at Anomaly Detection / T. Dunning, E. Friedman. – Sebastopol (California): O'Reilly, 2014. – 66 p.

3. Гундина, М. А. Особенности процесса определения количества аномальных значений при обработке измерительной информации / М. А. Гундина, П. С. Богдан, О. В. Юхновская. // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 2 (77). – С. 96–103.

3. Юхновская, О. В. Определение аномальных значений при анализе измерительных данных / О. В. Юхновская, К. В. Пантелеев, М. А. Гундина // Новые направления развития приборостроения : материалы 17-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов, Минск, 17–19 апреля 2024 г. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: О. К. Гусев (пред. редкол.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2024. – С. 220.

УДК 681+004

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Юхновская О. В., Гундина М. А., Пантелеев К. В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе представлено исследование методов автоматической обработки изображений с аномальными значениями. Целью исследования является разработка алгоритма локализации областей интереса на промышленных изображениях с последующим их распознаванием. Основное внимание уделено анализу различных алгоритмов выделения контуров, фильтрации и сегментации, таких как проекционный метод, нейронные сети, а также комбинированные подходы, использующие медианную фильтрацию и бинаризацию. Алгоритм реализован в системе Wolfram Mathematica и предназначен для обработки изображений, получаемых с промышленного оборудования. Предлагаемое решение позволяет улучшить четкость контуров и повысить точность распознавания, что подтверждается экспериментальными результатами.

Ключевые слова: промышленное изображение, аномальные значения, область интереса, бинаризация, компьютерная система Wolfram Mathematica.

APPLICATION OF COMBINED ALGORITHMS FOR AUTOMATED ANALYSIS OF INDUSTRIAL IMAGES

Юхновская О.В., Hundzina M., Pantišalev K.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. This study presents an investigation of automatic image processing methods for detecting anomalous values in instrumentation systems. The research aims to develop an algorithm for localizing regions of interest in industrial images, followed by their recognition. Special attention is given to analyzing various contour detection, filtering, and segmentation algorithms, such as projection methods, neural networks, and combined approaches using median filtering and binarization. The algorithm is implemented in Wolfram Mathematica and is designed to process images obtained from industrial equipment. The proposed solution improves contour clarity and enhances recognition accuracy, as confirmed by experimental results.

Key words: industrial image, anomalous values, region of interest, binarization, computer system Wolfram Mathematica.

*Адрес для переписки: Гундина М. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: hundzina@bntu.by*

Автоматическая обработка изображений с аномальными значениями является актуальной задачей в приборостроении, поскольку может использоваться для автоматического выделения областей интереса и сжатия исходных данных [1]. Устройства, работающие с такими алгоритмами, представляют собой программно-аппаратные комплексы. Стандартный комплекс включает

четыре модуля: получение изображения, извлечение области интереса, сегментацию и распознавание для дальнейшей обработки. Эффективность и точность системы в значительной мере зависят от второго модуля, для которого применяются различные подходы. Так, алгоритм с использованием проекции и евклидова расстояния достигает 87 % производительности [2]. Алгоритм на основе

скользящих концентрических окон и вероятностной нейронной сети – 86 % [3]. Использование фильтрации и шаблонного сопоставления увеличивает производительность до 91 % [4]. Алгоритм, использующий анализ краев и нейронную сеть с прямой связью, достигает 92,3 % скорости распознавания символов [5]. В данной работе ставится цель разработки и применения алгоритма, объединяющего эти подходы для выявления аномальных значений на изображениях, полученных с промышленного оборудования.

Цель исследования – разработка алгоритма в системе Wolfram Mathematica для локализации области интереса с целью последующего распознавания. Алгоритм основан на фильтрации и анализе краев изображения.

Согласно требованиям к промышленным изображениям, они должны быть четкими, на нейтральном фоне и не содержать посторонних объектов, позволяя однозначно идентифицировать элементы внешнего вида изделия при разном освещении.

В качестве изображения для анализа используется карта распределения поверхностного электростатического потенциала полимерного композиционного материала на основе Полиэфирэфиркетон (ПЕЕК). Изображение получено при сканировании поверхности образца бесконтактным зарядочувствительным зондом [6] с шагом сканирования 2 мм по квадрату и последующей бикубической интерполяцией измерительных данных. Областью интереса являлась непосредственно поверхность образца, представляющая собой круг диаметром 5 см, для последующего статистического анализа особенностей распределения поверхностного потенциала.

На рисунке 1, *a* представлено исходное изображение, на основе которого проводится анализ. Для правильного анализа контраста и яркости в изображении гистограмма исходного изображения представлена на рисунке 1, *б*.

Гистограмма отражает степень контраста, измеряемую как разницу яркостей между светлыми и темными областями. Широкие гистограммы указывают на высококонтрастные сцены, в то время как узкие гистограммы свидетельствуют о пониженном контрасте и возможной малоинформативности изображения. Выравнивание гистограммы помогает улучшить визуальную информативность (рисунок 2).

Далее изображение преобразуется в полутоновое, и незначительные компоненты удаляются. В системах технического зрения широко применяются медианные фильтры, которые эффективно сглаживают импульсные шумы. Применение медианного фильтра к изображению устраняет артефакты, оставляя четкие границы (окно обычно охватывает три элемента и увеличивается до пяти при необходимости).

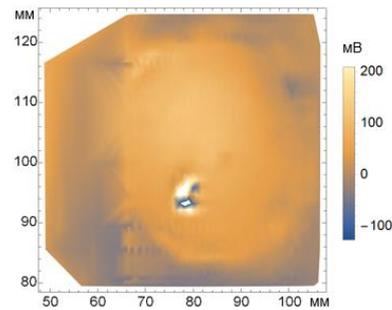
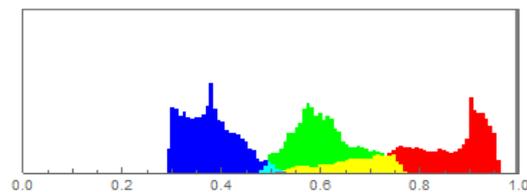
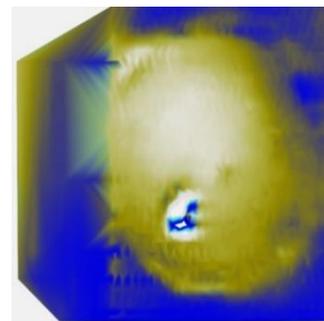
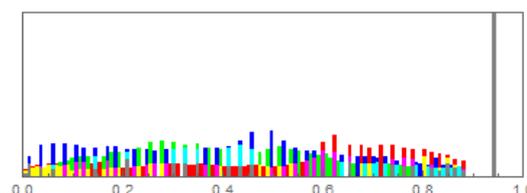
*a**б*Рисунок 1 – Исходное изображение (*a*) и гистограмма исходного изображения (*б*)*a**б*Рисунок 2 – Изображение с выровненной гистограммой (*a*) и гистограмма (*б*)

Рисунок 3 – Бинарное изображение после обработки

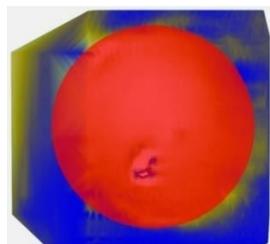


Рисунок 4 – Автоматически выделенная область интереса

Для выделения контуров необходимо, чтобы границы изображения были четкими, тонкими и без разрывов, что достигается бинаризацией изображения с правильно подобранным порогом. Процесс медианной фильтрации, эрозии и дилатации показан на рисунок 3.

Границы выделяются на основе резких изменений яркости, указывающих на перепады, связанные с формой, ориентацией или материалом объектов. В идеале результат выделения – это набор кривых, определяющих границы и другие значимые области.

На завершающем этапе определяется прямоугольная область интереса, координаты которой представлены на рисунке 4.

Литература

1. Weihua, W. License Plate Recognition Algorithm Based on Radial Basis Function Neural Networks // Intelligent Ubiquitous Computing and Education, International Symposium. – 2009. P. 38–41.
2. Hegt, H. A. A high performance license plate recognition system / H. A. Hegt, R. J. Dela Haye, N. A. Khan // Proc. IEEE Int. Conf. Syst., Man, Cybern. – 1988. – V. 5. – P. 4357–4362.
3. A license plate-recognition algorithm for intelligent transportation system applications / C. Anagnostopoulos [et al.] // IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. – 2006. – V. 7, № 3. – P. 377–392.
4. Optical recognition of motor vehicle license plates / P. Comelli [et al.] // IEEE Trans. Veh. Technol. – 1995. – V. 44, № 4. – P. 790–799.
5. Jiao, J. B. A configurable method for multi-style license plate recognition / J. B. Jiao, Q. X. Ye, Q. M. Huang // Pattern Recognit. – 2009. – V. 42, № 3. – P. 358–369.
6. Универсальный цифровой зондовый электрометр для контроля полупроводниковых пластин / А.Л. Жарин [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14, № 3. – С. 161–172.
7. Digital contact potential probe in studying the deformation of dielectric materials / K. Pansialeyeu [et al.] // Informatics, Control, Measurement in Economy and Environmental Protection. – 2020. – V. 4, № 10. – P. 57–60.

Секция 4. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.3.038.825.2

CONTINUOUS WAVE AND PASSIVELY Q-SWITCHED Er,Yb:GdMgB₅O₁₀
MICROCHIP LASERS

Gorbachenya K.¹, Volkova E.², Maltsev V.², Koporulina E.², Kisel V.¹

¹Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

²Department of Crystallography and Crystal Chemistry, Moscow State University
Moscow, Russian Federation

Abstract. We demonstrate continuous wave and passively Q-switched Er,Yb:GdMgB₅O₁₀ microchip lasers emitting in the spectral range of 1.5–1.6 μm. A maximal output power of 220 mW was obtained at 1568 nm at absorbed pump power of 2.3 W with the slope efficiency of 18 %. By using of MBE-grown Cr:ZnS thin layer as a saturable absorber laser pulses with duration of 24 ns and energy of 3 μJ at the repetition rate of 50 kHz were obtained at the wavelength of 1568 nm.

Key words: erbium, borate crystals, microchip laser, passively Q-switched laser.

МИКРОЧИП ЛАЗЕРЫ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА Er,Yb:GdMgB₅O₁₀, РАБОТАЮЩИЕ В
НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ И РЕЖИМЕ ПАССИВНОЙ МОДУЛЯЦИИ ДОБРОТНОСТИ
Горбаченя К. Н.¹, Волкова Е. А.², Мальцев В. В.², Копорулина Е. В.², Кисель В. Э.¹

¹НИЦ оптических материалов и технологий, Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²Кафедра кристаллографии и кристаллохимии, Московский государственный университет
Москва, Российская Федерация

Аннотация. В работе продемонстрированы выходные характеристики микрочип лазеров на основе кристаллов Er,Yb:GdMgB₅O₁₀, работающих в непрерывном режиме и режиме пассивной модуляции добротности в спектральной области 1,5–1,6 мкм. Максимальная выходная мощность 220 мВт получена на длине волны 1568 нм при поглощенной мощности накачки 2,3 Вт и дифференциальной эффективности 18 % непрерывном режиме генерации. При использовании тонкого слоя Cr:ZnS в качестве насыщающегося поглотителя реализован режим пассивной модуляции добротности, получены лазерные импульсы с длительностью 24 нс, энергий 3 мкДж и частотой следования 50 кГц на длине волны 1568 нм.
Ключевые слова: эрбий, кристаллы боратов, микрочип лазер, режим пассивной модуляции добротности.

Адрес для переписки: Горбаченя К. Н., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: gorby@bntu.by

Lasers emitting in the 1.5–1.6 μm spectral range are widely used in rangefinders and LIDAR systems. For compact rangefinders cheap and reliable pulsed laser sources with low power consumption for integration into handheld devices are used. For application in rangefinding systems with pulse accumulation technique lasers should emit pulses with high average output power and repetition rate of kHz ranges. Passive Q-switching is one of the most simple and reliable method to achieve abovementioned requirements.

The oxoborate crystals co-doped with erbium and ytterbium ions were shown as promising candidates for 1.5–1.6 μm passively Q-switched lasers with high average power and pulse repetition rates [1]. Distinguishing characteristic of these hosts compared with widely used phosphate glasses is a high thermal conductivity. The most efficient laser operation in continuous-wave mode was demonstrated for huntite-type Er,Yb:REAl₃(BO₃)₄ (RE=Y, Gd, Lu) [2] and pentaborate Er,Yb:REMgB₅O₁₀ (RE=Y, La, Gd) [3] crystals. For the Er,Yb:GdMgB₅O₁₀ crystal, passively

Q-switched laser operation was demonstrated using Co:MgAl₂O₄ crystal as one of the most widespread saturable absorbers for 1.5 μm lasers. However, long laser pulses with duration up to 215 ns and repetition rate not exceeding of 42 kHz were obtained [4]. Recently, we presented the growth technique of Er,Yb:GdMgB₅O₁₀ (GMBO) crystal as well as its spectroscopic and laser properties in continuous-wave mode [3]. In this Letter, laser performance of Er,Yb:GMBO crystal in Q-switched regime of operation by the usage of MBE-grown Cr:ZnS thin layer as saturable absorber is presented [5].

Er,Yb:GMBO (Er = 2.0 at.%, Yb = 11 at.%) crystal was grown by high-temperature solution growth on dipped seeds technique from K₂Mo₃O₁₀ flux. As a result, visually macrodefect-free Er,Yb:GMBO single crystal with a size of 24×15×12 mm was grown. The Er,Yb:GMBO crystal is characterized by the spectroscopic properties necessary for efficient laser operation in the spectral range of 1.5–1.6 μm. The maximal absorption cross-section of 1.5·10⁻²⁰ cm² is observed at 976 nm for polarization E//N_g. The energy

transfer efficiency from ytterbium to erium ions achieves 90 %. The emission cross-section was found to be $0.7 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2$ at the laser wavelength of 1568 nm for polarization of $E//N_m$ [3].

Thin films of Cr-doped ZnS were deposited using the high purity materials (99.999% purity) in the UHV MBE deposition system at base pressure of $\sim 4 \cdot 10^{-9}$ Torr and thermal evaporation. As a result high-quality polycrystalline films transparent through the visible and infrared regions were obtained. Film thickness was kept in the range 2 to 8 μm with Cr content varied from 0.11 to 0.39 at. %.

The experimental setup of Q-switched laser experiments is demonstrated in Figure 1. As a pump source a fiber-coupled laser diode emitting near 976 nm was used. The pump beam was focused into 120 μm spot ($1/e^2$ intensity) inside the crystal. An active element - Er,Yb:GMBO N_p -cut crystal with the thickness of 1.5 mm was antireflection coated for both pump and lasing wavelengths. The saturable absorber Cr(0.1 at. %):ZnS crystalline layer with the thicknesses of 5.8 μm , corresponding to initial transmission of 98.8 % at the laser wavelength of 1568 nm, was deposited on 1 mm-thick $\varnothing 5$ mm sapphire substrate, while the output coupler with transmission of 2% at the laser wavelength was deposited on the second side of sapphire substrate. The input mirror (HR@1.5 μm + HT@0.98 μm) was also deposited on $\varnothing 5$ mm sapphire substrate.

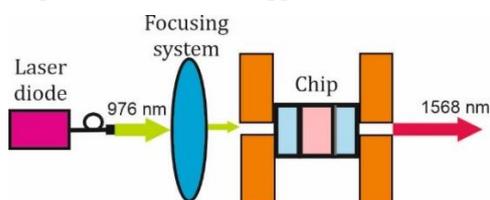


Figure 1 – The setup for Q-switched laser experiments

Input mirror, active element, saturable absorber were set in a «chip» (Figure 2) mechanically by the usage of copper holder with the hole at the center to permit passing of pump and laser beams. The geometrical cavity length was 2.5 mm.

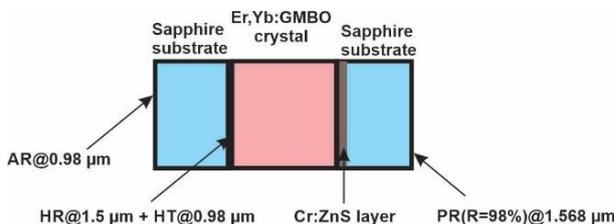


Figure 2 – The characterization of the chip

At first, continuous-wave (CW) laser experiments were carried out. For this goal the sapphire substrate with deposited Cr:ZnS was changed to sapphire substrate with the deposited output coupler coating with the transmission of 2% at the laser wavelength. As a result the maximal output power of 220 mW was obtained at 1568 nm at 2.3 W of absorbed pump

power with the slope efficiency of 18 %. Input-output characteristics of CW Er,Yb:GMBO laser is presented in the Figure 3.

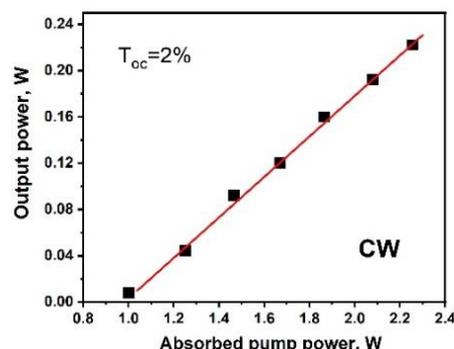


Figure 3 – Output characteristics of CW Er,Yb:GMBO microchip laser

Laser pulses with an energy of 3 μJ and duration of 24 ns were obtained at the wavelength of 1568 nm. The maximal repetition rate was as high as 50 kHz when the incident pump power was 9 W. The laser radiation was linearly polarized ($E//N_m$). The spatial profile of the output beam was TEM_{00} mode with $M^2 < 1.2$. The oscilloscope traces of the shortest single Q-switched pulse and corresponding pulse train are shown in Figure 4.

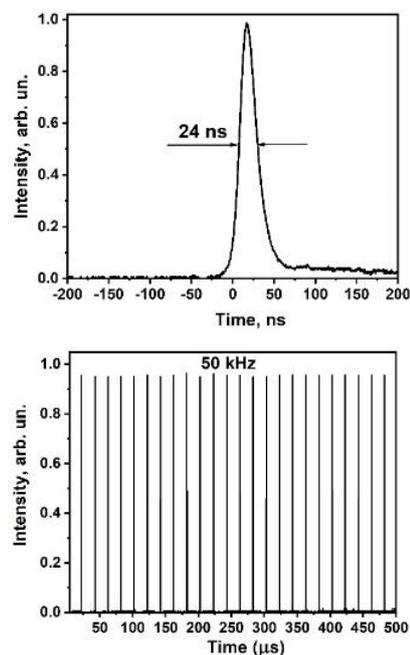


Figure 4 – Oscilloscope traces

References

1. Monolithic 1.5 μm Er,Yb:GdAl₃(BO₃)₄ eye-safe laser / K. N. Gorbachenya [et al.] // Opt. Mat. – 2019. – V. 88. – P. 60–66.
2. High efficient continuous-wave diode-pumped Er,Yb:GdAl₃(BO₃)₄ laser / K. N. Gorbachenya [et al.] // Opt. Lett. – 2013. – V. 38. – P. 2446–2448.
3. Growth, spectroscopic characterization and continuous-wave laser operation of Er,Yb:GdMgB₅O₁₀

crystal / K. N. Gorbachenya [et al.] // Inorganics. – 2024. – № 12. – P. 240–249.

4. Passively Q-switched Er,Yb:GdMgB₅O₁₀ pulse laser at 1567 nm / Y. Chen [et al.] // OSA Continuum. – 2019. – № 2. – P. 3598–3603.

5. Spectral-luminescent properties of vapor deposited Cr:ZnS thin films and their application as saturable absorbers for 1.5- μ m erbium lasers / N. Tolstik [et al.] // Opt. Mater. Express. – 2018. – № 8. – P. 522 – 530.

УДК 621.384.4

МОЩНЫЙ СВЕТОДИОДНЫЙ УФ-ИЗЛУЧАТЕЛЬ ДЛЯ АГРОФИЗИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

Аладов А. В.¹, Закгейм А. Л.¹, Иванова А. Е.^{1,2}, Черняков А. Е.¹

¹НТЦ микроэлектроники РАН

²СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В работе представлены результаты разработки и исследований мощного светодиодного излучателя ближнего УФ-спектра ($\lambda = 370$ нм) для агрофизических применений. Исследованы особенности мощностных и спектральных характеристик при работе в режиме больших уровней возбуждения – выходная оптическая мощность до 8,5 Вт. С помощью тепловизионной техники оценены тепловые параметры светодиодного модуля. Оптическая схема излучателя на основе светодиодной матрицы формирует заданную кривую силы света и однородную облученность засвечиваемого поля.

Ключевые слова: светодиод, УФ-излучение, спектральные характеристики, агрофизика.

HIGH-POWER LED UV EMMITTER FOR AGROPHYSICAL APPLICATIONS

Aladov A.¹, Zakgeim A.¹, Ivanov A.^{1,2}, Chernyakov A.¹

¹SHM R&E Center, RAS

²ETU «LETI»

Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract. The paper presents the results of development and research of a powerful LED emitter of the near UV spectrum ($\lambda = 370$ nm) for agrophysical applications. The features of the power and spectral characteristics are investigated in the mode of high excitation levels - output optical power up to 8.5 W. Thermal imaging equipment is used to evaluate the thermal parameters of the LED module. The optical scheme of the emitter based on the LED matrix forms a given luminous intensity curve and uniform irradiance of the illuminated field.

Key words: ED, UV radiation, spectral parameters, agrophysics.

Адрес для переписки: Аладов А. В., ул. Политехническая, 26, г. Санкт-Петербург 194021, Российская Федерация, e-mail: aaladov@mail.ioffe.ru

Введение. В последние годы в технологии выращивания растений в условиях искусственного освещения широко внедряются светодиодные источники света с легко регулируемыми спектральными и мощностными характеристиками освещения. Одной из главных задач в этом случае является управление световой средой с целью повышения эффективности продукционного процесса растений, обусловленного, в частности, фоторегуляцией с помощью излучения ближнего ультрафиолетового (УФ) диапазона. Воздействие УФ-излучения на растения демонстрирует усиление фотосинтеза и роста, а также повышение питательности растений, производя антиоксидантные соединения [1], кроме того, оно запускает ряд фоторецепторов [2]. Кротохром, фитохром и, в меньшей степени, фитохром вызывают ряд изменений, в том числе увеличение выработки хлорофилла, формирование более крупных листьев, улавливающих больше света, и открытие устьиц на листьях, пропускающих больше углекислого газа [3].

Спектры излучения современных мощных УФ-светодиодов хорошо соответствуют основным тре-

бования по воздействию этого излучения на растения. Светодиоды, наряду с увеличенным сроком службы, сниженным потреблением электроэнергии, позволяют управлять световыми параметрами по заданному алгоритму. В данной работе на основе светодиодной матрицы СВМ-120-UV Luminus (США) разработан и исследован УФ-излучатель, предназначенный для фитотронных установок, используемых в Агрофизическом научно-исследовательском институте РАН (Санкт-Петербург).

В качестве элементной базы вышеприведенная матрица с длиной волны в максимуме $\lambda = 370$ нм (рисунок 1) использовалась для создания управляемого источника света.

Матрица площадью $3,5 \times 4,5$ мм² состоит из 12 параллельно включенных излучающих кристаллов на теплоотводящем основании, допускающем входной ток до 18 А и входную мощность до 80 Вт.

Детальные измерения электрических, световых и спектральных параметров проводились с помощью комплекса «OL770-LED High-speed Test and Measurement System» (Optronic Lab), а тепловых параметров с помощью тепловизора «Свифт», разработки ИФП СО РАН.

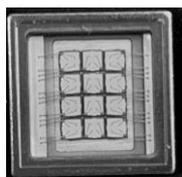


Рисунок 1 – Фотография общего вида светодиодной матрицы

Энергетические характеристики светодиодной матрицы: зависимости выходной оптической мощности P_{opt} и КПД от входной электрической мощности представлены на рисунке 2.

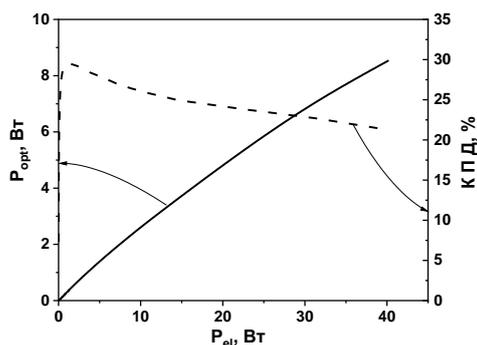


Рисунок 2 – Зависимости оптической мощности и КПД от входной электрической мощности

Как можно видеть, наблюдается хорошая линейность световой характеристики с достижением в предельном режиме оптической мощности 8,5 Вт при КПД 21 %. Достигнутые энергетические параметры позволяют использовать модуль в качестве источника для осветителя с большой площадью охвата растений и высокой плотностью освещения в излучателе с соответствующей оптической схемой формирования светового пучка. На рисунке 3 представлены спектральные характеристики модуля

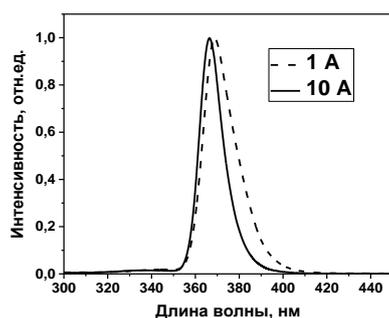


Рисунок 3 – Спектры излучения матрицы для двух значения тока 1 А и 10 А

Как видно из рисунка 3 спектры излучения остаются во всем диапазоне токов стабильными, небольшой сдвиг пиковой длины волны λ в пределах 3 нм, а также изменение полуширины в пределах 5 нм не существенны для рассматриваемых применений.

Измеренное температурное распределение по площади светодиодной матрицы выявило незначительную температурную неоднородность между центральными и периферийными областями даже на предельных токах, что позволяет стабилизировать и контролировать температуру непосредственно на корпусе.

Важным элементом конструкции разработанного УФ-излучателя является оптическая система для формирования заданного угла излучения и однородной облученности освещаемого поля. Для используемой матрицы были рассчитаны и проанализированы две оптические схемы, обеспечивающие формирование направленного в необходимом угле светового пучка с кривой силы света, создающей однородную освещенность. Одна из схем состоит из двух линз с высоким пропусканием системы 84 % и неравномерность освещенности не более 20 % на поле размером 300×300 мм. Вторая представляет собой трех линзовый объектив с факонном. Пропускание при этом ниже 76 %, однако, при этом неоднородность освещения уменьшилась и не превышает 15 %. С учетом запаса мощности используемой матрицы обе оптические системы можно использовать для данного излучателя в зависимости от решаемых агрофизических задач. Достижимый уровень облученности составляет до 80 Вт/м².

Конструктивно управляемый УФ-излучатель объединяет собственно матрицу излучателя, оптическую систему, источник питания и радиоканал обмена данными с управляющим компьютером. Соответствующий интерфейс позволяет контролировать интенсивность УФ-излучения и изменять ее во времени по заданному алгоритму, а также отображать значения в специальном окне дисплея.

В настоящее время проводится экспериментальная оценка применимости разработанного УФ-излучателя в качестве фитотронного модуля при выращивании различных растений.

Благодарности. Исследования параметров СД выполнены в ЦКП «Элементная база радиофоники и нанoeлектроники: технология, диагностика, метрология».

Литература

1. Effects of light quality on CO₂ assimilation, chlorophyll-fluorescence quenching, expression of Calvin cycle genes and carbohydrate accumulation in *Cucumis sativus* / M. Bernal M. [et al.] // J. Photochem Photobiol B. – 2009. – V. 96, № 1. – P. 30–37.
2. Effect of supplemental UV-A irradiation in solid-state lighting on the growth and phytochemical content of microgreens / M. Bernal [et al.] // Int. Agrophys. – 2015. – V. 29, № 1. – P. 13–22.
3. Interactive effects of UV radiation and water availability on seedlings of six woody Mediterranean species / A. Brazaitytė [et al.] // Physiol Plant. – 2013. – V. 147, № 2. – P. 234–47.

УДК 681.785; 504.064

ФОРМИРОВАНИЕ ЭТАЛОНОВ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ АВАРИЙНЫХ СБРОСОВ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ЗОНДИРОВАНИЕМ ПОТОКА ЖИДКОСТИ

Алексеев В. А.¹, Усольцев В. П.¹, Шульмин Д. Н.¹, Юран С. И.²

¹Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

²Удмуртский государственный аграрный университет
Ижевск, Российская Федерация

Аннотация. Рассматривается вариант создания эталонов для обнаружения вредных сбросов в жидких средах с использованием параллельного лазерного зондирования среды. Для этого проводятся экспериментальные исследования возможных вредных веществ аварийных сбросов на измерительном стенде для анализа спектров веществ. Проводится специальная обработка полученных результатов с преобразованием их в относительное описание, которое позволяет получить эталоны в двоичной последовательности. Приводится схема измерительного стенда.

Ключевые слова: аварийные сбросы, лазерное зондирование, относительное описание, спектры поглощения веществ аварийных сбросов.

FORMATION OF STANDARDS FOR THE DETECTION OF EMERGENCY DISCHARGES PARALLEL LASER SENSING OF THE LIQUID FLOW

Alekseev V.¹, Usoltsev V.¹, Shulmin D.¹, Yuran S.²

¹Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov

²Udmurt State Agrarian University
Izhevsk, Russian Federation

Abstract: The option of creating standards for the detection of harmful discharges in liquid media using parallel laser sensing of the medium is being considered. For this purpose, experimental studies of possible harmful substances of emergency discharges are carried out on a measuring stand for analyzing the spectra of substances. A special processing of the obtained results is carried out with their transformation into a relative description, which allows us to obtain standards in a binary sequence. The diagram of the measuring stand is given.

Key words: emergency discharges, laser sensing, relative description, absorption spectra of substances from emergency discharges.

Адрес для переписки: Юран С. И., ул. Студенческая, г. Ижевск 11426069, Российская Федерация
e-mail: yuran-49@yandex.ru

Известна задача обнаружения вредных сбросов в жидкие среды с использованием лазерного зондирования потока жидкости [1–3]. В ряде задач появление сбросов связано с аварийной ситуацией на производстве, поэтому требуется определение сбросов в реальном масштабе времени.

Наиболее эффективным способом является параллельное зондирование жидких сред рядом лазерных лучей с набором различных длин волн излучения.

Для распознавания вещества сброса необходимо создание эталонов различных веществ, возможных к появлению в сбросах. Как правило, количество этих веществ не превышает десятка различных фракций жидкости.

Цель. В работе предлагается один из вариантов способов построения эталонов веществ в аварийных сбросах.

Методы. Процедура построения эталонов содержит три этапа, выполняемых последовательно.

На первом этапе производится априорно анализ спектров поглощения определенных веществ аварийных сбросов. При анализе спектров выделяется одна длина волны поглощения спектра из числа экстремумов спектра поглощения (λ_i) для всех веществ аварийных сбросов, получив пачку длин волн $\{\lambda_1 \dots \lambda_i \dots \lambda_n\}$, где n – количество веществ.

На втором этапе проводятся экспериментальные исследования веществ из определенного списка аварийных сбросов с целью определения значений поглощения веществ на пачке излучений с длинами волн $\{\lambda_1 \dots \lambda_n\}$, где n – количество веществ аварийных сбросов.

Желательно проводить исследования на устройстве с параллельным зондированием лазерным излучением, что позволит получить значения поглощения в спектрах в единое время измерения.

В результате исследований для каждого из веществ будет получен спектр дискретных значений амплитуд поглощения $\{A_{j1}, \dots, A_{jn}\}$, где j – номер вещества.

На третьем этапе строятся эталоны для каждого из веществ. Полученные спектры веществ из A_{jn} значений не могут использоваться в качестве эталонов, поскольку реальные значения могут отличаться по величине, а полученные спектры не инвариантны по сдвигу амплитуд, которые зависят от плотности концентрации потока жидкости.

Поэтому предлагается использовать относительное описание полученных спектров в виде соотношений между значениями амплитуд спектров. Формализацию соотношений можно осуществить, используя, например, отношение «больше-меньше». Тогда получим последовательность в виде

$$\{A_{j1} R_1 A_{j2}, A_{j1} R_2 A_{j3}, A_{j1} R_3 A_{j4}, \dots A_{j1} R_{n-1} A_{jn}\}.$$

Подобные последовательности можно построить для всех соотношений.

Подобного вида описания будут избыточны для большинства видов распознавания веществ аварийных сбросов.

Опыт показал, что достаточным описанием является описание между соседними составляющими спектра:

$$\{A_{j1} R_1 A_{j2}, A_{j2} R_2 A_{j3}, A_{j3} R_3 A_{j4}, \dots A_{j(n-1)} R_n A_{jn}\}.$$

При использовании правила:

$$A_{ji} \geq A_{j(i+1)} \rightarrow P \equiv 1,$$

$$A_{ji} \leq A_{j(i+1)} \rightarrow P \equiv 0$$

можно получить кодовую двоичную последовательность, которая и будет являться эталоном для определения (распознавания) вещества j .

В этом случае, при решении задачи обнаружения вещества аварийного сброса полученные при измерении спектры веществ при параллельном лазерном зондировании должны быть приведены к соотношениям с использованием указанного выше правила. Далее происходит сравнение полученной двоичной последовательности с эталонами веществ.

Для проведения экспериментальных исследований веществ с целью построения эталонов распознавания необходимо использовать стенд измерений (рисунок 1), содержащий источники лазерного излучения ИИ1...ИИ n , излучающие на длинах волн $\lambda_1 \dots \lambda_n$, ампула с исследуемым веществом j , фотоприемники ФП1...ФП n , аналого-цифровые преобразователи АЦП и компьютер.

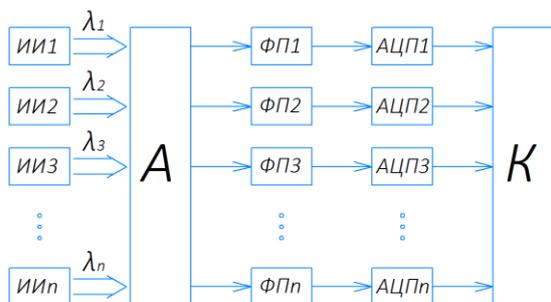


Рисунок 1 – Структурная схема стенда измерений спектра веществ аварийного сброса

Исследуемое вещество аварийного сброса помещается в ампулу. По управлению компьютера излучатели производят лазерное зондирование вещества в ампуле. Полученные сигналы (от-

клики) с фотоприемников преобразуются в цифровой код с помощью АЦП и принимаются компьютером. После этого полученные значения спектра вещества преобразуются в двоичную последовательность относительного описания и записываются в память эталонов. Эти операции выполняются для всех веществ аварийных сбросов.

Указанные процедуры построения эталонов возможно осуществить в системе устранения аварийных сбросов на производстве. В этом случае система должна иметь возможность помещения ампулы с исследуемым веществом в магистраль протекания потока стоков. При этом в компьютере управления системой должна быть установлена программная система формирования эталонов.

Для обеспечения обнаружения вредных веществ в реальном масштабе времени необходимо получать измеренные значения спектральных амплитуд веществ с построением относительного описания с параллельной обработкой данных. Двоичная последовательность относительного описания получается одновременно с обработкой данных в параллельных аналого-цифровых каналах. Сравнение соответствующих значений спектра происходит логическими схемами параллельно. Идеальным контроллером обработки данных является многопроцессорный контроллер.

Заключение. Таким образом, задача обнаружения аварийных сбросов для устранения последствий аварий, относящихся к запроектным авариям, может быть решена. Указанные виды аварий возможны на объектах нефтегазового оборудования, на объектах машиностроения и химического производства.

Рассмотренный подход построения систем локализации и устранения запроектных аварий полезен для специалистов, создающих лазерные системы, а также для студентов соответствующих специальностей.

Литература

1. Патент РФ 2771221 МПК G01N 21/31, G01N 21/85, G08B 21/12. Устройство селективного контроля аварийных сбросов / В. А. Алексеев, С. И. Юран, В. П. Усольцев, Д. Н. Шульмин. Оpubл. 28.04.2022.
2. System Eliminating Emergency Discharges in Industrial Facilities Waste Waters Using Relative Signal Description / V. A. Alekseev [et al.] // Devices and Methods of Measurements. – 2022. – Т. 13, № 2. – С. 105–111.
3. Использование многозондового модулированного лазерного излучения для идентификации сгустков веществ в потоке жидкости // В. А. Алексеев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14, № 3. – С. 207–213.

УДК 535.317; 681.7

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СКЛЕЕННОГО И НЕСКЛЕЕННОГО КОЛЛИМАТОРНЫХ ОБЪЕКТИВОВ АХРОМАТОВ

Алешкевич К. В., Артюхина Н. К., Кузнецик В. О.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлен расчет габаритных размеров и конструктивных параметров двухлинзового склеенного и несклеенного объективов-ахроматов, проведен сравнительный анализ полученных систем.

Ключевые слова: объектив коллиматора, ахромат, габаритный расчет, анализ конструкции объективов.

CALCULATION ALGORITHM AND COMPARATIVE ANALYSIS OF GLUED AND NONGLUED COLLIMATOR ACHROMAT LENSES

Aleshkevich K. V., Artyukhina N. K., Kuznechik V. O.

Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The calculation of overall dimensions and design parameters of two-lens glued and nonglued achromat lenses is presented, a comparative analysis of the obtained systems is carried out

Key words: collimator achromat lens, dimensional calculation, analysis of lens design.

Адрес для переписки: Алешкевич К.В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: kari.alyshkevich@gmail.com.

Коллиматоры используются в составе измерительных установок для контроля оптических систем, поэтому к их качеству предъявляются жесткие требования, в особенности, к объективам.

Объективы коллиматоров бывают линзовыми, состоящими из двух: склеенные или несклеенные (рисунок 1) или более линз и зеркальными: сферические и параболические зеркала.

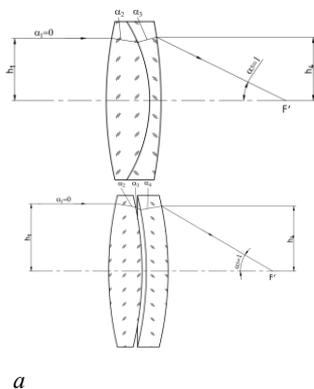


Рисунок 1 – Объективы коллиматорные: а – склеенный; б – несклеенный

К основным особенностям объективов относятся: диаметр от 50 до 300 мм (в склеенных до 150 мм); небольшие aberrации: сферическая и кома, хроматизм положения, малое угловое поле (1–2°) и относительное отверстие изменяется в пределах 1:5–1:20.

На основе анализа качества рассчитанной оптической системы, величин остаточных aberrаций и технологичности объектива делается заключение о возможности использования объектива в коллиматорах.

Цель работы – сравнительный анализ двухлинзовых склеенного и несклеенного коллиматорных объективов ахроматов, рассчитанных для одинакового фокусного расстояния.

Проведен расчет габаритных размеров и конструктивных параметров объективов по представленному алгоритму (таблица 1), согласно методике Слюсарева Г. Г. [1].

Таблица 1 – Формулы для расчета объективов

№	Название	Формула
1	Нормировка первого параксиального луча	$\alpha_1 = 0; h_1 = 1; \alpha_n = 1$
2	Показатель дисперсии материала	$v = \frac{n - 1}{n_{\lambda 1} - n_{\lambda 2}}$
3	Оптические силы линз	$\varphi_1 = \frac{v_1}{v_1 - v_2}; \varphi_2 = 1 - \varphi_1$
4	Третий нулевой угол	$\alpha_3 = \left(1 - \frac{1}{n_3}\right) Q + \varphi_1$
5	Инвариант поверхности склейки	$P^\infty = aQ^2 + bQ + 1 = 0,$ $a = 1 + \frac{2\varphi_1}{n_2} + 2(1 - \varphi_1)/n_3;$ $b = \frac{3}{n_2 - 1}\varphi_1^2 - \frac{3}{n_3 - 1}(1 - \varphi_1)^2 - 2 + 2\varphi_1;$ $c = \frac{n_2}{(n_2 - 1)^2}\varphi_1^3 + \frac{n_3}{(n_3 - 1)^2}(1 - \varphi_1)^3 + \frac{n_3}{n_3 - 1}(1 - \varphi_1)^2$
6	Уравнение исправления комы	$S_{II}^\infty = W^\infty = 0$
7	Уравнение исправления сферической aberrации	$S_I^\infty = \sum_1^4 P_v = P^\infty = 0$

Продолжение таблицы 1

8	Уравнение для нахождения второго нулевого луча	$D\alpha_2^2 + E\alpha_2 + F = 0$ $D = \alpha_3 b^2(2a + 3) + (1 - \alpha_3)a^2(2b + 3)A^2;$ $E = 2ABa^2(2b + 3)(1 - \alpha_3) - \alpha_3^2 b^2(a + 3) + Aa^2(b + 3)(\alpha_3^2 - 1);$ $F = B^2 a^2(2b + 3)(1 - \alpha_3) + Ba^2(b + 3)(\alpha_3^2 - 1) + \alpha_3^3(b^2 - a^2) + a^2.$
9	Уравнение для нахождения четвертого нулевого луча	$\alpha_4 = A\alpha_2 + B$ $A = \alpha_3 b(a + 2)/[a(b + 2)(\alpha_3 - 1)];$ $B = [\alpha_3^2(b - a) + a]/[a(b + 2)(1 - \alpha_3)];$ $a = \frac{1}{n_2} - 1; b = \frac{1}{n_4} - 1.$
10	Контроль полученных значений	$P_v = \left[\frac{\delta\alpha_v}{\delta(1/n_v)} \right]^2 \delta \left(\frac{\alpha_v}{n_v} \right) =$ $W_v \frac{\delta\alpha_v}{\delta(1/n_v)};$ $W_v = \frac{\delta\alpha_v}{\delta(1/n_v)} \delta \left(\frac{\alpha_v}{n_v} \right)$
11	Радиуса кривизны	$r_{vTH} = h_v(n'_v - n_v)/(n'_v \alpha'_v - n_v \alpha_v)$
12	Стрелки прогиба	$k_1 = r_1 - \sqrt{r_1^2 - \frac{D_n^2}{4}};$ $k_2 = r_2 + \sqrt{r_2^2 - \frac{D_n^2}{4}}$
13	Толщины линз	$d_1 = k_1 + d_{min} - k_2;$ $d_3 = 0,1D_n$
14	Высоты нулевых лучей	$h_{n+1} = h_n - d_n \alpha_{n+1}$
15	Относительные высоты	$h_n/h_1 = \bar{h}_n$
16	Радиуса линз конечной толщины	$r_n = r_{nTH} \cdot \bar{h}_n$
17	Углы нулевого луча	$\alpha_{n+1} = \frac{n_n \alpha_n}{n_{n+1}} + \frac{h_n(n_{n+1} - n_n)}{n_{n+1} r_n}$

В коллиматорных объективах исправляются сферическая aberrация и кома (формулы (6) и (7)), а также хроматизм положения. Коррекционными параметрами в обеих системах являются: для сферической aberrации – второй угол нулевого луча, для комы – четвертый угол нулевого луча в несклеенном и третий угол в склеенном.

Для исправления хроматизма положения были рассмотрены различные комбинации стекол и выбрана комбинация, наиболее удовлетворяющая условию ахроматизации. Для обоих объективов это комбинация из марок стекол К8 и Ф1.

В ходе aberrационного расчета и последующей оптимизации объективов с заданным фокусным расстоянием $f' = 600$ мм и относительным отверстием 1:6,5 в программном пакете «Орал»

были получены конструктивные и aberrационные параметры, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры рассчитанных объективов

Параметры	Склеенный	Несклеенный
Радиусы кривизны	$r_1 = 273,72$ $r_2 = -253,94$ $r_3 = -3826,93$	$r_1 = 363,73$ $r_2 = -202,85$ $r_3 = -205,47$ $r_4 = -886,81$
Толщины по оси	$d_1 = 10$ $d_2 = 9$	$d_1 = 11$ $d_2 = 0,1$ $d_3 = 9$
Фокусное расстояние f' и фокальный отрезок S'_f , мм	$f' = 599,6;$ $S'_f = 587,09$	$f' = 599,6;$ $S'_f = 589,88$
Сферическая aberrация $\Delta s'$, мм	0,00058	-0,00036
Хроматизм положения $\Delta s'_{C'-e}$, мм	0,34705	0,29302
Неизопланатизм η , %	-0,2869	-0,0022

Из анализа полученных систем можно сделать следующие выводы:

- габариты у несклеенного объектива больше, чем у склеенного;

- склеенная система имеет большой радиус кривизны последней поверхности (технологически получить сложнее);

- у несклеенного объектива сферическая aberrация, хроматизм положения и неизопланатизм меньше, у склеенного – меньше сферохроматической разности;

- центрирование несклеенного объектива будет обеспечиваться конструкцией крепления объектива, а склеенного – клеейкой (линзы диаметром более 150 мм не склеиваются);

- в несклеенном объективе малый воздушный промежуток между линзами, поэтому конструкция механики будет более сложной (промежуточное кольцо должно быть с врезанием в линзы, что приведет к увеличению диаметров линз, а также введению дополнительной операции в технологический процесс изготовления линзы);

- в склеенном объективе на качество изображения влияет клеящий слой (при диаметрах линзы больше 70 мм клеящий слой значительно ухудшает качество изображения из-за напряжений в клеящем веществе).

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что для заданных параметров наилучшим качеством изображения будет обладать несклеенный объектив. Однако, при проектировании коллиматорных объективов необходимо учитывать не только, результаты компьютерных методов расчета оптических систем, но и

технологические особенности изготовления, сборки, юстировки и контроля коллиматорных объективов (более сложная конструкция крепления линз у несклеенного объектива), а также возможности предприятия-изготовителя.

Литература

1. Апенко, М. И. Задачник по прикладной оптике: учеб. пособие для вузов. / М. И. Апенко, Л. А. Запругаева, И. С. Свешникова. – М.: Недра, 1987. – 310 с.

УДК 517.91

МОДЕЛИРОВАНИЕ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ПП ZEMAX И ПЕРЕАППРОКСИМАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ

Артюхина Н. К., Мамай Е. Ю., Филиппов Ф. А., Шанчук В. А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Представлено моделирование асферических поверхностей и переаппроксимация в ПП ZEMAX.

Ключевые слова: моделирование оптических компонентов, четная асферика, нечетная асферика, переаппроксимация.

MODELING OF ASPHERICAL SURFACES IN THE ZEMAX SP AND SURFACE RE-APPROXIMATION

Artyukhina N., Mamay Y., Philippov F., Shanchuk V.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The modeling of aspherical surfaces and the re-approximation in the ZEMAX SP are presented.

Key words: Modeling of optical components, even aspherics, odd aspherics, re-approximation.

Адрес для переписки: Мамай Е. Ю., пр. Независимости 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: georgemamay@gmail.com

Пакет программ Zemax позволяет моделировать многие типы оптических компонентов, включая элементы с обычными сферическими поверхностями, а также с асферическими, торриадальными, цилиндрическими и другими [1].

Выбор типа поверхности (рисунок 1) осуществляется по соответствующей ячейке колонки Surface type таблицы редактора данных (LDE):

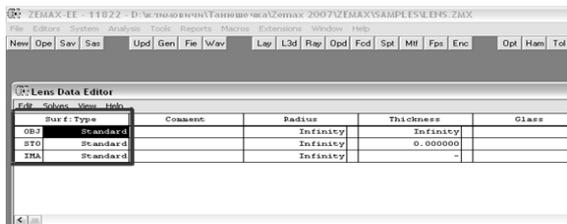


Рисунок 1 – Колонка поверхностей

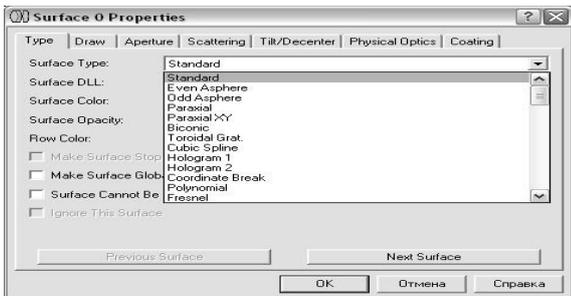


Рисунок 2 – Типы поверхностей

А далее во вкладке Type (рисунок 2) устанавливается нужный тип поверхности.

К категории стандартных в ПП Zemax относятся следующие поверхности:

- сферические;
- плоские (частный случай сферических);
- асферические второго порядка.

Прогиб стандартной поверхности определяется формулой:

$$z = \frac{h^2}{R(1 + \sqrt{1 - (1+k)(\frac{h}{R})^2}} \tag{1}$$

где $\frac{1}{R}$ – кривизна поверхности; h – радиальная координата; k – коническая постоянная поверхности, которая определяется следующим образом:

$$k = -e^2, \tag{2}$$

где e – эксцентриситет образующей.

Отметим, $k < -1$ – для гиперболических поверхностей; $k = -1$ – для параболических поверхностей; $0 < k < 1$ – для эллиптических поверхностей; $k = 0$ – для сферических поверхностей.

Таким образом для того, чтобы задать Standard поверхность, требуется определить только несколько величин, таких как радиус кривизны, расстояние по оси до следующей поверхности, коническая постоянная и марку стекла (или зеркальную поверхность MIRROR).

Поверхность типа «Четная асферика» является осесимметричной. В модели такой поверхности используются только четные степени радиальных координат. Стрелка прогиба поверхности определяется формулой:

$$z = \frac{h^2}{R(1 + \sqrt{1 - (1+k)(\frac{h}{R})^2})} + \sum_{i=2}^n A_{2i} h^{2i}, \quad (3)$$

где 8 коэффициенты A_{2i} вводятся в соответствующие параметрические колонки редактора (рисунок 3):

Surf. Type	2nd Order Term	4th Order Term	6th Order Term	8th Order Term	10th Order Term	12th Order Term	14th Order Term	16th Ord.
001 Standard								
002 Even Asphere	1.560000	-0.544000	0.1360000	-0.000000	-0.430000	0.000000	-0.100000	
003 Standard								

Рисунок 3 – Ввод коэффициентов

Для поверхность типа «Нечетная асферика» в полиноме используются как четные, так и нечетные степени. Стрелка прогиба поверхности определяется формулой:

$$z = \frac{h^2}{R(1 + \sqrt{1 - (1+k)(\frac{h}{R})^2})} + \beta_1 r^1 + \beta_2 r^2 + \beta_3 r^3 + \beta_4 r^4 + \beta_5 r^5 + \beta_6 r^6 + \beta_7 r^7 + \beta_8 r^8. \quad (4)$$

Коэффициенты при членах полинома (рисунок 4) вводятся в соответствующие ячейки таблицы LDE после того как осуществлен выбор типа поверхности (Odd asphere):

Surf. Type	1st Order Term	2nd Order Term	3rd Order Term	4th Order Term	5th Order Term	6th Order Term
001 Standard						
002 Odd Asphere	1.150000	-0.300000	0.000000	2.420000	0.020000	0.48
003 Standard						
004 Standard						
005 Standard						

Рисунок 4 – Ввод коэффициентов

Модель четной асферика наиболее часто используется для описания корректоров Шмидта, а нечетной – для генерирования поверхностей конической формы – аксиконов.

Чтобы определить тип и параметры несферической поверхности 2-го порядка необходимо первоначально привести ее меридиональное уравнение к виду:

$$y^2 = \pm 2 \frac{b^2}{a^2} x \pm \frac{b^2}{a^2} x^2. \quad (5)$$

Радиус кривизны и коническая постоянная поверхности равны:

$$r = \pm \frac{b^2}{a^2}; k = -1 \pm \frac{b^2}{a^2}. \quad (6)$$

Полученные значения задаем в соответствующие ячейки таблицы редактора данных системы.

Для определения профиля несферической поверхности удобно совмещать начало координат с вершиной несферической поверхности; тогда уравнение профилей второго порядка будет иметь вид:

$$y^2 = Az + Bz^2 + Cz^3 + \dots \quad (7)$$

Для кривых второго порядка равенство нулю коэффициента В приводит к параболическому профилю; при отрицательном В уравнение профиля становится уравнением эллипса и при равенстве этого коэффициента минус единице - уравнение окружности. При положительных значениях коэффициента В уравнение кривых второго порядка будет выражать собой гиперболы.

Коэффициент А уравнения (7) определяет собой величину радиуса кривизны при вершине кривой, по формуле:

$$A = 2r_0. \quad (8)$$

Необходима переаппроксимация поверхности. Пересчет коэффициентов предлагается выполнять с помощью программного пакета Opal [2]. Используем вкладки «Технология – Технология асферики – Пересчет коэффициентов» (рисунки 5 и 6).

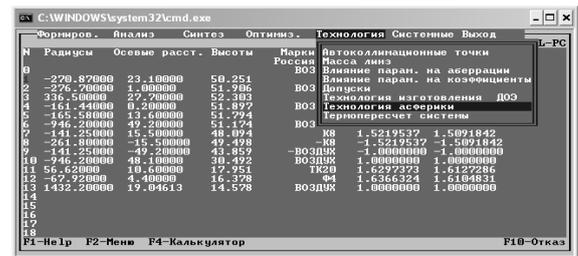


Рисунок 5 – Вкладка технология асферики

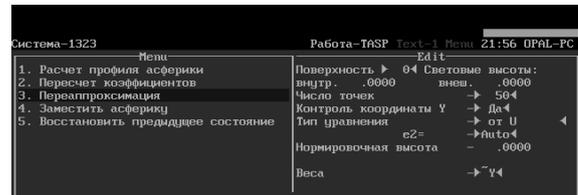


Рисунок 6 – Вкладка пересчет коэффициентов

Для обеспечения равенства уравнения асферической поверхности высших порядков от U (OPAL) и уравнения четной асферики (ZEMAX) необходимо провести переаппроксимацию уравнения асферической поверхности высших порядков любого заданного типа (OPAL) в уравнение от U при следующих условиях: $e^2 = 1$ и $H = 1$, где e^2 – квадрат эксцентриситета, H – нормированная высота.

Литература

1. Zemax. Optical design program. User's guide. – Tucson, Arizona, USA: Zemax Development Corporation, 2005. – С. 385–390.
2. Артюхина, Н. К. Основы компьютерного моделирования оптических систем различных типов: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы» / Н. К. Артюхина. – Минск: БНТУ, 2016. – 182 с.

УДК 621.373.8

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ КОНВЕКЦИИ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ

Аскарова А. Я., Аскарков М. Р.

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ»
Казань, Российская Федерация

Аннотация. Исследовано влияние параметров лазерного источника на образование наплывов, возникающие в процессе термокапиллярной конвекции, а также критическая скорость перемещения лазера, при которой термокапиллярная конвекция развиваться не успевает, и наплывы не образуются.

Ключевые слова: термокапиллярная конвекция, поверхностная лазерная обработка, наплывы.

EFFECT OF THERMOCAPILLARY CONVECTION ON SURFACE QUALITY IN LASER METALWORKING

Askarova A., Askarov M.

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev-KAI
Kazan, Russian Federation

Abstract. The influence of the laser source parameters on the formation of surges that occur during thermocapillary convection, as well as the critical speed of laser movement, at which thermocapillary convection does not have time to develop, and surges do not form, is investigated.

Keywords: thermocapillary convection, surface laser treatment, surges.

Адрес для переписки: Аскаркова А. Я., ул. К. Маркса, 10, г. Казань 420111, Российская Федерация
e-mail: alsuask@mail.ru

Термокапиллярная конвекция проявляется в образовании волнообразного профиля поверхности с углублением в центре и небольшими высотами по краям. Это явление возникает из-за градиента температур [1]. Температура на поверхности жидкости меняется радиально от наибольшего значения T_1 в центре ванны (рисунок 1) до наименьшего значения на ее периферии T_2 . Так как температура жидкости в центре ванны наибольшая, то поверхностное натяжение там имеет наименьшее значение. В радиальном направлении от центра поверхностное натяжение жидкости увеличивается, что в свою очередь приводит к разнице поверхностного натяжения в центре и на границе.

Явление термокапиллярной конвекции появляется при воздействии теплового источника на поверхность жидкости. Одним из видов теплового источника является лазерный луч, используемый при поверхностной лазерной закалке металлов с оплавлением.

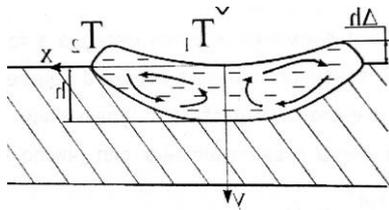


Рисунок 1 – Термокапиллярная конвекция

При таком поверхностном упрочнении металла в месте воздействия лазера образуется жидкая лунка. Качество поверхности ухудшается, возникают неровности в виде волнистости. Рассматривая

расплавленный металл как ньютоновскую жидкость можно проследить влияние термокапиллярной конвекции на качество поверхности металла.

Образование наплывов застывшего металла является нежелательным эффектом поверхностной лазерной обработки деталей, так как это вид поверхностного упрочнения чаще всего является окончательным видом обработки металлических изделий. Поэтому исследования, связанные с нахождением и устранением вышеуказанных факторов, влияющих на профиль поверхности, имеют важное прикладное значение.

На образование наплывов влияют теплофизические параметры металла и температурные условия на свободной поверхности: разности температур между центром жидкой ванны и ее периферией, коэффициента поверхностного натяжения, плотности, толщины расплава. Перепад высоты Δh пропорционален разности ΔT между центром жидкой ванны и ее периферией и коэффициенту поверхностного натяжения и обратно пропорционален плотности и ускорению свободного падения. Перепад Δh также обратно пропорционален толщине расплава h . Это свидетельствует о том, что сопротивление обратному (гравитационному) течению снижается с увеличением толщины расплавленного металла, т. е. с увеличением мощности точечного нагрева, увеличивается глубина ванны металла, что приводит к уменьшению влияния конвективного перемешивания, в результате чего высота наплывов уменьшается.

$$\Delta h = \frac{3 \gamma T_m}{2 g \rho \gamma_0}, \quad (1)$$

где Δh – перепад высоты; γ – температурный коэффициент поверхностного натяжения; ρ – плотность материала; T_m – температура плавления, g – ускорение свободного падения; y_0 – функция, определяющая зависимость от параметров теплового источника.

Если рассматривать образцы разных металлов, то можно проанализировать, как будет изменяться высота наплыва.

При глубине проплавления $h = 1$ мм, разности $\Delta T = 100^\circ$ для стали ($\rho_{ст} = 7,8$ г/см³, $\gamma = 0,49$ мН/мК) $\Delta h = 1$, для титана ($\rho_t = 4,5$ г/см³, $\gamma = 0,26$ мН/мК) $\Delta h = 0,9$, для алюминия ($\rho_a = 2,38$ г/см³, $\gamma = 0,35$ мН/мК) $\Delta h = 2,4$.

Таким образом, для алюминия высота наплыва примерно в два раза больше, чем у стали и титана, так как плотность алюминия значительно ниже.

Для различных мощностей лазерного излучения также меняется высота наплыва.

На примере нержавеющей стали 304 с теплофизическими характеристиками $\rho_{ст} = 7,8$ г/см³, $T_m = 1809$ °К, $\Delta T = \min 100^\circ$ $\gamma = 0,49$ мН/мК, в зависимости от глубины проплавления в определенной точке расплава для различных мощностей лазерного излучения: $h = 4$ мм – $\Delta h = 0,27$; $h = 6$ мм – $\Delta h = 0,18$; $h = 10$ мм – $\Delta h = 0,1$; $h = 16$ мм – $\Delta h = 0,07$; $h = 18$ мм – $\Delta h = 0,06$.

Таким образом, с увеличением мощности лазерного излучения, с увеличением глубины проплавления, высота наплывов уменьшается.

Регулируя параметры теплового источника, можно влиять на развитие термокапиллярной конвекции, вызывающей образование наплывов на поверхности различных металлов.

Перемещая тепловой источник с той или иной скоростью, можно влиять на искривление свободной поверхности. Следовательно, существует возможность найти критическую скорость перемещения сканирующего лазера, при которой высота наплыва вследствие термокапиллярной конвекции будет стремиться к нулю [2].

$$W_{кр} = \frac{d}{2\tau} = \left(\frac{\Delta T g y_0}{12 T_m} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где $W_{кр}$ – критическая скорость теплового источника; τ – время; ΔT – разность температур.

Из уравнения видно, что скорость движения теплового источника зависит от самого материала, выраженному через температуру плавления T_m и от параметров теплового источника, выраженных через функции y_0 , ΔT .

Выражение (2) показывает: регулируя значения параметров теплового источника (мощность, плотность мощности и др.), изменяя перепад температур в центре и на периферии расплавленного пятна, можно подобрать критическую скорость перемещения теплового источника для конкретного металла, когда отклонения свободной поверхности от плоской, вызванные термокапиллярной конвекцией, будут стремиться к нулю.

Литература

1. Гарифуллин, Ф. А. Тепловая неустойчивость слоя упруговязкой жидкости с учетом термокапиллярных сил / Ф. А. Гарифуллин, Ф. Х. Тазюков // Сб.: Тепло-массообмен в химической технологии. – Вып. 5. – Казань: КХТИ. – 1977. С. 26–30.
2. Аскарова, А. Я. Влияние термокапиллярной конвекции на форму свободной поверхности жидкости. Автореферат дис. НЭБ, Казань: 2001.

УДК 681.7

ТЕПЛОВИЗИОННО-НОЧНОЙ МОНОКУЛЯР Белохвостик Е. В., Довжик В. Г., Кузнечик В. О.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация: Рассмотрено устройство двухканального телевизионно-ночного монокуляра и его основные элементы.

Ключевые слова: ночной канал, тепловизионный канал, монокуляр.

THERMAL IMAGING-NIGHT MONOCULAR Belokhvoistik E., Dovzhik V., Kuznechik V.

*Belorussian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Annotation: The device of a two-channel television-night monocular and its main elements are considered.

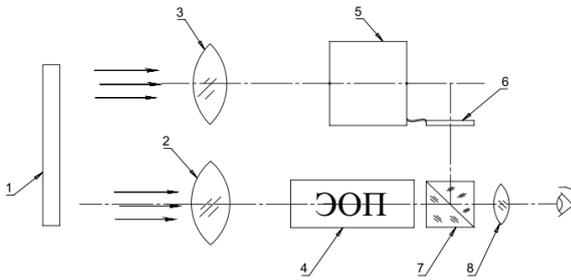
Keywords: night channel, thermal imaging channel, monocular.

*Адрес для переписки: Кузнечик В. О., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: kuznechik@bntu.by*

Для расширения тактико-технических возможностей опτικο-электронных приборов (ОЭП) наблюдения используют комбинированные ОЭП, к которым можно отнести двухканальный тепло-

визионно-ночной монокуляр (рисунок 1), в состав которого входит ночной (работает по отраженному от объекта излучению) и тепловизионный (работает по собственному тепловому излучению

от объекта) каналы с общим для обоих каналов окуляром, что позволяет уменьшить массогабаритные характеристики монокуляра.



1 – объект; 2 – объектив ночного канала; 3 – объектив тепловизионного канала; 4 – ЭОП; 5 – микроболометрический датчик; 6 – микродисплей; 7 – призма К-0°; 8 – окуляр

Рисунок 1 – Оптическая схема монокуляра

Ночной канал прибора, в состав которого входит линзовый объектив 2, электронно-оптический преобразователь (ЭОП) 4 и линзовый окуляр 8, позволяет наблюдать объекты в условиях низкой освещенности, благодаря усилению яркости изображения, рассматриваемого через окуляр 8 с экрана ЭОП 4. ЭОП позволяет не только усилить яркость изображения более чем в 10 000 раз, но и преобразовать его из ИК-изображения в видимое для человека. Дальность видения ночного канала зависит от уровня освещенности объекта 1 ночью, разрешающей способности объектива 2, ЭОП 4 и разрешающей способности глаза наблюдателя, а также от согласования характеристик окуляра 8 с характеристиками глаза человека (например, с помощью диоптрийной подвижки окуляра 8). Использование ЭОП в приборе позволяет использовать аналоговый сигнал, получать изображение привычное для наблюдателя, снизить энергопотребление прибора и увечить ресурс его работы, по сравнению с цифровым прибором ночного видения (ПНВ), а также обеспечить приемлемую дальность видения.

Тепловизионный канал используется для наблюдения объектов в полной темноте, при плохих погодных условиях (туман, пыль, дождь, дым), в условиях засветки, т.е. когда не эффективен ночной канал монокуляра. ИК-объектив тепловизионного канала 3 формирует на сенсоре 5 (миниатюрная полупроводниковая матрица из терморезисторов, имеющих чувствительность в сотые доли градуса и преобразующая оптические сигналы в массив электрических сигналов) температурную карту (или карту разности мощности излучения) всей наблюдаемой в поле зрения области. Сигнал от матрицы обрабатывается электроникой и выводится на жидкокристаллический экран (микродисплей 6) в виде изображения (улучшенное с помощью специального программного обеспечения), которое наблюдатель видит

через призму К-0° 7 в окуляр 8. Полученное изображение отличается от изображения в ночном канале (хуже детализация). Питание осуществляется от аккумуляторов (батареинный отсек на рисунке не показан).

Кратко рассмотрим основные элементы тепловизионного канала монокуляра.

ИК-объективы, используемые в тепловизорах можно классифицировать по следующим признакам:

- рабочий спектральный диапазон (3–5 мкм, 8–14 мкм);

- тип тепловизора ($\lambda = 3\text{--}5\text{ мкм}$ – охлаждаемые; $\lambda = 8\text{--}14\text{ мкм}$ – неохлаждаемые);

- с постоянным и переменным (изменяемым «скачками» или плавно) фокусным расстоянием;

- величина фокусного расстояния (обычно 50–300 мм);

- диафрагменное число или относительное отверстие (влияет на освещенность изображения, создаваемого объективом в плоскости датчика);

- минимальный размер пикселя ИК-датчика (функция передачи модуляции (ФПМ) объектива, по которой с помощью частоты Найквиста определяют минимальный размер пикселя);

- максимальный размер пикселя ИК-датчика (имеет значение в первую очередь для внеосевых пучков);

- терморастраиваемость в следствии широкого рабочего диапазона температур прибора, например, $\pm 50\text{ }^\circ\text{C}$ (возникают термоабберации, изменяется положение деталей в оправках или возникают напряжения из-за различия температурных коэффициентов линейного расширения материалов), приводящая к ухудшению качества изображения (корректируется обычно путем атермализации объективов).

Предлагаемые на рынке ИК-датчики изображения представляют собой микросхемы формирования изображения, созданные путем объединения массива оптических детекторов, чувствительных к тепловому излучению, с интегральной схемой, специально разработанной для считывания электрических сигналов с этого массива детекторов (генерируют электронное изображение в одном из стандартов электронного видеозображения).

Существует множество ИК-датчиков, используемых для производства тепловизоров. Эти датчики можно разделить по следующим критериям:

- тип (принцип работы) датчика (фотонные; тепловые, чаще всего применяются в виде микроболометрических матриц);

- охлаждение датчика (охлаждаемые и неохлаждаемые);

- спектральный диапазон датчика;

- разрешение/размер пикселя (разрешение не менее 1024×768 , пиксель 12 мкм или 10 мкм);

- максимальная частота кадров выходного изображения (50–60 кадров в секунду).

Технология изготовления ИК-датчиков сложна, поэтому между датчиками, представленными на рынке, существует некоторая разница в качестве. Большинство производителей делают ИК-датчики на классы, которые различаются по таким параметрам, как детектируемость, NETD (разница температур, эквивалентная шуму), коэффициент усиления, шум, динамические, количество и расположение битых пикселей, ФПМ, относительная спектральная чувствительность.

Дисплей – это электронный модуль, используемый во многих портативных тепловизорах в качестве внутреннего блока, способного отображать изображение на выходе. Если дисплей миниатюрный, то для увеличения изображения на дисплее используется окулярная линза. Дисплеи и окуляры тепловизоров представляют собой те же блоки, что и в приборе ночного видения.

Комбинирование тепловизионного канала с каналом ночного видения в ОЭП предоставляет ряд значительных преимуществ:

– **улучшенная идентификация объектов:** тепловизоры хорошо работают в полной темноте, а ночные приборы могут усиливать световые сигналы. Это позволяет более точно идентифицировать объекты;

– **работа в сложных условиях:** в условиях плохой видимости (дым, дождь) тепловизоры остаются эффективными, тогда как ночное видение может быть ограничено;

– **снижение ложных срабатываний:** использование обоих типов сенсоров позволяет повысить надежность обнаружения за счет перекрестной проверки данных.

Применение двухканального тепловизионно-ночного монокуляра увеличивает эффективность обнаружения и идентификации объектов, а также открывает новые возможности для применения в других сферах деятельности человека.

Литература

1. Грузевич, Ю. К. Оптико-электронные приборы ночного видения. – М.: Физматлит, 2014. – 276 с.

УДК 53.089.5

ИСПЫТАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК MWIR КАМЕРЫ С ЦЕЛЬЮ МОНИТОРИНГА ПОЖАРОВ

Беляев Ю. В.¹, Литвинович Г. С.¹, Горский Д. А.², Котов Д. С.², Страшко И. Б.²

¹НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ»

²УП «Геоинформационные системы»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе представлены результаты испытаний оптических характеристик камеры MWIR диапазона для применения в раннем детектировании очагов возгораний. В исследовании определялись угловое поле зрения, угловое разрешение и спектральный диапазон камеры. Также представлены первые результаты по сравнению LWIR и MWIR тепловизоров в эксперименте по определению температуры пламени.

Ключевые слова: средневолновой ИК-диапазон, оптические характеристики, тепловизор.

MWIR CAMERA OPTICAL CHARACTERISTICS TESTING FOR FIRE MONITORING

Belyaev Yu.¹, Litvinovich H.¹, Gorsky D.², Kotov D.², Strashko I.²

¹A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University

²UE "Geoinformation Systems"

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The paper presents the results of testing the optical characteristics of MWIR camera for use in early detection of fires. The study determined the angular field of view, angular resolution, and spectral range of the camera. First results of LWIR and MWIR thermal imagers comparison in experiment for flame temperature determination are also presented.

Key words: MWIR, optical characteristics, thermal imager.

Адрес для переписки: Литвинович Г. С., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: litvinovichgs@yandex.by

Большинство усилий по раннему обнаружению лесных пожаров, по-прежнему предпринимаются наблюдателями. В современном мире развитие получают автоматизированные системы определения очагов возгораний в виду их масштабируемости, всепогодности и возможности круглосуточного мониторинга. Несмотря на то, что популярные на сегодня системы на основе камер видимого диапазона

успешно себя зарекомендовали, они имеют большое количество ложных срабатываний. К сожалению, они работают только в дневное время при не слишком сильном ветре, при котором столб дыма не уносит в сторону [1].

В виду описанных недостатков перспективными выглядят системы на работающие в LWIR (8–14 мкм) и MWIR (3–5 мкм) диапазонах. MWIR

диапазон имеет преимущество в очень большой дальности обнаружения (5–15 км). В представленной работе рассматриваются результаты испытаний оптических характеристик MWIR камеры GAVIN 615A.

Gavin 615A – универсальный охлаждаемый инфракрасный модуль, производства Global Sensor Technology, внешний вид которого представлен на рисунке 1, технические характеристики представлены в таблице 1.



Рисунок 1 – Внешний вид камеры GAVIN 615A

Таблица 1 – Технические характеристики MWIR камеры

Технический параметр		Значение
Детектор		Cooled MW 640×512
Материал детектора		МСТ
Размер пикселя, мкм		15
Спектральный диапазон, мкм		3,7 ±0,2–4,8 ±0,2
Количество пикселей		640×512
F-number		4
NETD, мК		≤ 25
Неравномерность		≤ 8 %
Фокусное расстояние, мм		15–300
Габариты с объективом, д×ш×в, мм		243×100×110
Масса с объективом, кг		2,42
Угловое поле зрения, ±5 %	Минимальное увеличение	35,49°×28,72°
	Максимальное увеличение	1,83°×1,47°

В силу того, что пространственное разрешение зависит от расстояния до объекта, целесообразнее определять угловое разрешение, т. е. угловой размер наименьших объектов, различимых на изображении. Для определения углового разрешения (размер минимального различимого объекта в угловом пространстве) производилось измерение специально изготовленной тестовой миры, состоящей из сходящихся нагретых проводящих нитей. Пример зарегистрированных изображений представлен на рисунке 2.

Угловое разрешение составило 0,098° (на минимальном увеличении) и 0,0024° (на максимальном увеличении).

Угловое поле зрения определялось на гониометрическом комплексе «Вектор-2». Комплекс «Вектор-2» состоит из квазиточечного источника излучения (нагретой нити), помещенного в фокус сферического вогнутого зеркала, в результате

чего формируется квазипараллельный пучок, полностью заполняющий апертуру камеры. Поле зрения составило 28,18°×34,98° (при минимальном увеличении) и 1,41°×1,76° (при максимальном увеличении).

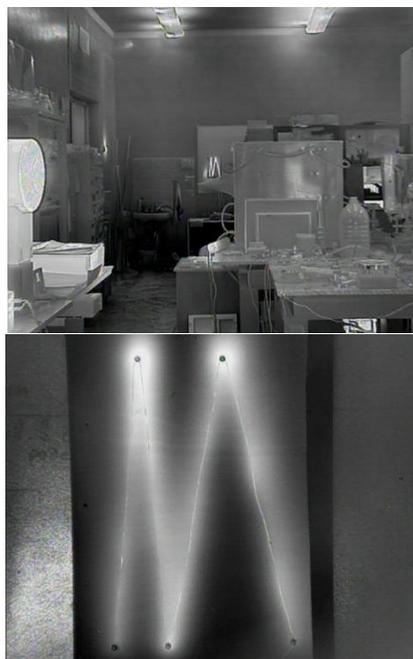


Рисунок 2 – Пример зарегистрированного изображения тестовой миры с минимальным (сверху) и максимальным (снизу) оптическим увеличением

Спектральный диапазон – область длин волн, в пределах которой тепловизор способен регистрировать оптическое излучение. Спектральный диапазон определялся на монохроматическом излучателе комплекса «ИК-Каменя». Камера, сфокусированная на выходную щель монохроматора, регистрирует оптический сигнал. Спектральный диапазон определяется по относительной спектральной чувствительности (рисунок 3) тепловизора по заданному уровню (обычно 0,7).

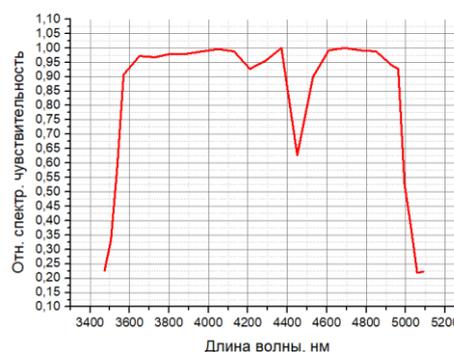


Рисунок 3 – Относительная спектральная чувствительность камеры

Для разработки алгоритмов определения пожаров в лаборатории был проведен эксперимент по определению температуры пламени искусственного источника пламени (парафиновой

свечи). Чтобы исключить эффект автоматической настройки тепловизором контраста на изображении в кадре были размещены два объекта с известными температурами. В качестве таких объектов выступали два абсолютно черных тела с температурами 80 °С и 461 °С. Регистрация производилась двумя тепловизорами: MWIR – GAVIN615A; LWIR – Zenmuse H20T.

Спектральный диапазон тепловизора по уровню 0,7 составляет 3,55–4,98 мкм.

Наличие резкого уменьшения относительной чувствительности в районе 4,4 мкм объясняется влиянием линии поглощения углекислого газа в атмосфере и не может исключено в условиях атмосферы.

Тепловизор LWIR диапазона смог определить температуру двух эталонных объектов: 84,2 ±2,6°С и 462,8 ±98,7 °С.

Тепловизор MWIR диапазона не смог оценить температуру, ввиду насыщения детектора даже при минимальном времени накопления сигнала.

Однако смог отобразить разогретые продукты горения свечи, что в совокупности с тепловизором LWIR способно уменьшить количество ложных срабатываний.

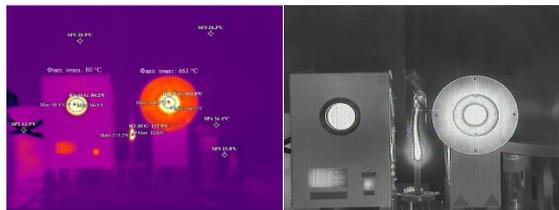


Рисунок 4 – примеры изображений для определения температуры пламени: LWIR – слева; MWIR – справа

Литература

1. Archeological Treasures Protection based on early Forest Wildfire Multi Band Imaging Detection System / B. Gouverneur [et al.] // *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications IX*. – 2012. – 85410J.

Equation Chapter 1 Section 1УДК 621

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ Yb³⁺ И Er³⁺ НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ Yb, Er:YLuAG

Вакалов Д. С., Чикулина И. С., Кичук С. Н.

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
Ставрополь, Российская Федерация

Аннотация. Впервые методом неактивного вакуумного спекания были получены образцы оптической керамики Yb, Er:YLuAG с различной концентрацией активаторов. Показано влияние концентрации Yb³⁺ и Er³⁺ на интенсивность люминесценции и время жизни возбужденного состояния Yb³⁺.

Ключевые слова: оптическая керамика, YLuAG, люминесценция, время жизни

EFFECT OF Yb³⁺ AND Er³⁺ CONCENTRATION ON THE LUMINESCENT PROPERTIES OF Yb, Er:YLuAG OPTICAL CERAMICS

Vakalov D., Chikulina I., Kichuk S.

North Caucasus Federal University
Stavropol, Russian Federation

Abstract. For the first time, samples of Yb, Er:YLuAG optical ceramics with different concentrations of activators were obtained using non-reactive vacuum sintering. The influence of the concentration of Yb³⁺ and Er³⁺ on the luminescence intensity and lifetime of the excited state of Yb³⁺ is shown.

Key words: optical ceramics, YLuAG, luminescence, lifetime.

Адрес для переписки: Вакалов Д. С., ул. Пушкина, 1, г. Ставрополь 355017, Российская Федерация
e-mail: megadims@gmail.com

Введение. Одним из перспективных направлений современного материаловедения является разработка активных сред усиления, работающих в области длин волн 1,5–1,65 мкм, так называемом «безопасном для глаз» диапазоне [1]. Лазеры работающие в этой области спектра могут применяться в медицине, в области инфокоммуникаций и т. д. Оптическая керамика со структурой граната, активированная Er³⁺ может успешно применяться для этих целей. Однако, малое сечение поглощения Er³⁺ в рабочем диапазоне излучения коммерческих диодов (940–980 нм) делает накачку малоэффективной. Для повышения эф-

фективности используются сенсбилизаторы, которые поглощают излучение и передают его активатору. Для Er³⁺ идеальным сенсбилизатором является Yb³⁺ из-за близкого расположения энергетических уровней возбужденного состояния.

Для мощных лазеров необходимо использовать матрицы с высокой теплопроводностью, при высоком уровне легирования. Этим критериям соответствует керамика на основе LuAG. Для удешевления производства ведется поиск составов с частичным замещением катионов Lu другими металлами при сохранении высоких теплофизических характеристик.

Таким образом, учитывая вышеизложенное, исследования люминесцентных свойств оптической керамики Yb, Er:YLuAG являются актуальными и перспективными. Особенно учитывая тот факт, что сведения об оптимальных концентрациях Yb и Er в матрице YAG являются немногочисленными и противоречивыми [1, 2], а для матриц YLuAG полностью отсутствуют.

Эксперимент. Образцы оптической керамики Yb, Er:YLuAG были получены путем нереактивного спекания керамических порошков в вакууме при температуре 1825 °С. Керамические порошки были изготовлены прокаливанием при 1150 °С порошков-прекурсоров, полученных методом обратного химического соосаждения из солей металлов, взятых в стехиометрическом соотношении. Для проведения эксперимента по влиянию концентрации активаторов на люминесцентные характеристики были изготовлены образцы керамики следующих составов: Yb (1 ат.%), Er (0,25 ат.%):YLuAG, Yb (3 ат.%), Er (0,5 ат.%):YLuAG, Yb (5 ат.%), Er (1 ат.%):YLuAG, Yb (10 ат.%), Er (3 ат.%):YLuAG, Yb (15 ат.%), Er (5 ат.%):YLuAG. Измерения спектров люминесценции и времени жизни возбужденного состояния проводили на спектрофлуориметре СФЛ-МДР.

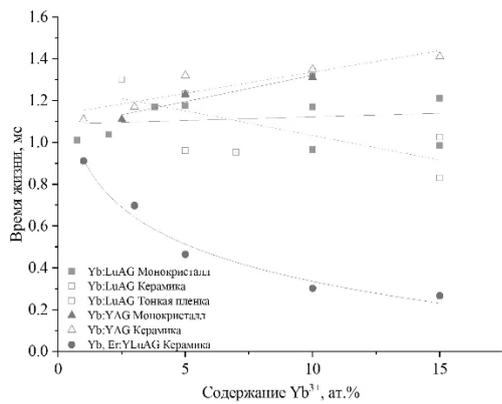


Рисунок 1 – Зависимости времени жизни возбужденного состояния от концентрации Yb³⁺ в керамике и монокристаллах на основе Yb:YAG, Yb:LuAG [3–11] и Yb, Er:YLuAG

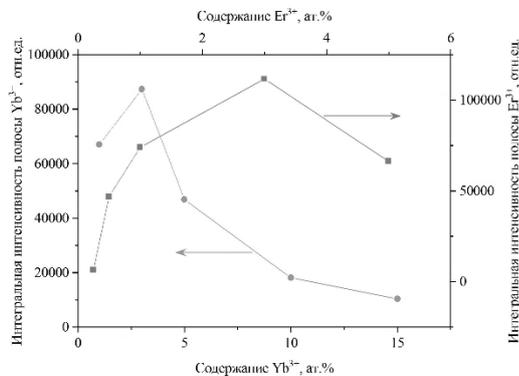


Рисунок 2 – Зависимости интегральной интенсивности люминесцентных полос Yb³⁺ и Er³⁺ от их концентрации в керамике Yb, Er:YLuAG

Результаты. Были проведены исследования керамических порошков, используемых для изготовления образцов оптической керамики. Результаты рентгенофазового анализа показали наличие во всех образцах фазы граната без каких-либо примесных фаз. Наблюдается увеличение параметра кристаллической решетки с ростом концентрации вводимых активаторов. Размеры кристаллитов порошка не зависят от концентрации активатора и составляют 90 ± 2 нм.

Результаты сканирующей электронной микроскопии показали, что керамические порошки представляют собой слабоагломерированные частицы, форма которых близка к сферической, а размеры частиц согласуются с данными рентгеновской дифракции.

Были проведены измерения кривых затухания полосы люминесценции Yb³⁺ (1030 нм) при возбуждении на длине волны 980 нм и определены времена жизни возбужденного состояния. Сравнение полученных результатов с литературными данными представлено на рисунке 1. Из рисунка видно, что для всех рассматриваемых материалов по литературным данным время жизни с увеличением концентрации Yb³⁺ увеличивается за исключением керамики на основе LuAG. При этом значения времени жизни полосы Yb³⁺, полученные для керамики Yb, Er:YLuAG существенно меньше, что указывает на перенос энергии возбуждения от Yb³⁺ к Er³⁺.

Эффективность передачи энергии от Yb³⁺ к Er³⁺ можно определить, используя выражение:

$$\eta_{ET} = 1 - \frac{\tau_s}{\tau_0}, \quad (1)$$

где τ_s – время жизни возбужденного состояния Yb³⁺; τ_0 – время жизни возбужденного состояния Yb³⁺ керамики без Er³⁺.

Используя данные из литературных источников и экспериментальные результаты, было определено, что наилучшая эффективность достигается при концентрации активаторов 10 ат.% Yb³⁺ и 3 ат.% Er³⁺ (таблица 1).

Таблица 1 – Эффективность передачи энергии от Yb³⁺ к Er³⁺

Yb ³⁺ ат. % / Er ³⁺ ат. %	τ_s , мс	η_{ET} , %
1/0,25	0,912	29,8
3/0,5	0,698	36,5
5/1	0,464	51,7
10/3	0,302	68,9
15/5	0,267	67,8

Были проведены измерения спектров люминесценции полос Yb³⁺ и Er³⁺ при возбуждении лазерным диодом 940 нм. Зависимости интенсивности исследуемых полос представлены на рисунке 2.

Также критерием эффективности передачи энергии можно считать отношение интенсивностей по-

лос люминесценции Er^{3+} к Yb^{3+} . С учетом этого, анализ экспериментальных результатов свидетельствует о том, что наиболее оптимальной концентрацией Er^{3+} является 3 ат.%, а оптимум концентраций Yb^{3+} лежит в области от 10 до 15 ат.%

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-23-00084) <https://rscf.ru/project/23-23-00084/>, использовано научное оборудование центра коллективного пользования СКФУ.

Литература

1. Optical properties of Er, Yb co-doped YAG transparent ceramics / J. Zhou [et al.] // *Ceram. Int.* – 2011. – V. 37, № 2. – P. 513–519.
2. 1532 nm sensitized luminescence and up-conversion in Yb,Er:YAG transparent ceramics / I. O. Vorona [et al.] // *Opt. Mater. (Amst.)*. – 2018. – V. 77. – P. 221–225.
3. Growth, spectroscopic, and laser properties of Yb³⁺-doped Lu₃Al₅O₁₂ garnet crystal / A. Brenier [et al.] // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 2006. – V. 23, № 4. – P. 676.
4. Toncelli, A. Optical properties of Yb³⁺ doped Lu₃Al₅O₁₂ crystal fibers grown by μ -pulling down

technique / A. Toncelli, M. Alshourbagy, M. Tonelli // *J. Appl. Phys.* – 2008. – V. – 104, № 10.

5. Fabrication and properties of highly transparent Yb:LuAG ceramics / Y. Fu [et al.] // *J. Alloys Compd.* – 2016. – V. 664. – P. 595–601.

6. Comparative investigation on Yb:YAG and Yb:LuAG transparent laser ceramics / C. Ma [et al.] // *Ceram. Int.* – 2015. – V. 41, № 10. – P. 14635–14640.

7. Yb:LuAG laser ceramics: a promising high power laser gain medium / D. Luo [et al.] // *Opt. Mater. Express.* – 2012. – V. 2, № 10. – P. 1425.

8. Characterisation and laser performance of a Yb:LuAG double-clad planar waveguide grown by pulsed laser deposition / S. V. Kurilchik [et al.] // *Appl. Phys. B.* – 2019. – V. 125, № 11. – P. 201.

9. Thermal and laser properties of Yb:LuAG for kW thin disk lasers / K. Beil [et al.] // *Opt. Express.* – 2010. – V. 18, № 20. – P. 20712.

10. Photoluminescence and laser behavior of Yb:YAG ceramic / F. Tang [et al.] // *Opt. Mater. (Amst.) Elsevier B. V.* 2012. – V. 34, № 5. – P. 757–760.

11. Dependence of the Yb³⁺ emission cross section and lifetime on temperature and concentration in yttrium aluminum garnet / J. Dong [et al.] // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 2003. – V. 20, № 9. – P. 1975

УДК 621.327

ВЛИЯНИЕ ДЕГРАДАЦИИ РАЗРЯДНОЙ ОБОЛОЧКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ КСЕНОНОВОЙ ЛАМПЫ

Гавриш С. В., Чиликина П. А.

ООО «Научно производственное предприятие «Мелитта»
Москва, Зеленоград, Российская Федерация

Аннотация. Работа посвящена изучению влияния деградации внутренней поверхности разрядной оболочки под воздействием импульсного ксенонового разряда короткой длительности с энергией 60 Дж на эксплуатационные характеристики излучения. Изучены зависимости энергии излучения от срока службы лампы, трансформация пространственного распределения ультрафиолетового и инфракрасного излучения после осаждения слоев материала электродов и испарения разрядной оболочки.

Ключевые слова: импульсная лампа, деградация оболочки, УФ-излучение, плазменный канал, индикатриса, энергия излучения, телесный угол, распыление электродов, испарение оболочки.

THE EFFECT OF DISCHARGE SHELL DEGRADATION ON THE CHARACTERISTICS UV-RADIATION OF A PULSED XENON LAMP

Gavrish S., Chilikina P.

Scientific and Production Enterprise “Melitta”, Ltd
Moscow, Zelenograd, Russian Federation

Abstract. The work is devoted to the study of the influence of the degradation of the inner surface of the discharge shell under the influence of a pulsed xenon discharge of short duration with an energy of 60 J on the operational characteristics of the radiation. The dependences of the energy of radiation on the service life of the lamp, the transformation of the spatial distribution of ultraviolet and infrared radiation after the deposition of layers of electrode material and evaporation of the discharge shell are studied.

Key words: flash lamp, degradation of the shell, UV radiation, plasma channel, indicatrix, radiation energy, solid angle, electrode sputtering, shell evaporation.

Адрес для переписки: Гавриш С. В., ул. Миклухо-Маклая, 16/10, г. Москва, 117997, Российская Федерация
e-mail: svgavr@list.ru

Импульсный ксеноновый разряд короткой длительности ($\tau < 150$ мкс) является источником мощного УФ-излучения. Поэтому сегодня газоразрядные лампы на основе импульсного разряда

в ксеноне получили широкое распространение в установках УФ-обеззараживания воздуха и поверхностей [1]. Наиболее важной эксплуатационной характеристикой данного класса ламп явля-

ется срок службы, который в первую очередь определяется процессами деградации внутренней поверхности кварцевой разрядной трубки (оболочки, колбы), обращенной к плазменному каналу. При прохождении импульса тока короткой длительности в момент достижения им максимума на поверхности оболочки под воздействием высокой температуры происходит испарение кварцевого стекла с последующим образованием кристобалита. Параллельно с указанным процессом осуществляется аналогичный термоудар по поверхности электродов (в первую очередь катода), материал которых распыляется на внутреннюю стенку колбы. Все рассмотренные процессы приводят к изменению прозрачности колбы, что способствует снижению выходной мощности УФ-излучения, которая является одним из основных критериев срока службы лампы. В данной работе нами выполнены исследования влияния процесса деградации поверхности кварцевой оболочки на энергию излучения в спектральном интервале 200–300 нм и пространственное распределение излучения (индикатрису) в УФ- и ИК-диапазонах.

Методика испытаний. Для проведения исследований нами были изготовлены три экспериментальные импульсные лампы, заполненные ксеноном до давления в холодном состоянии 200 мм рт. ст. Разрядный канал экспериментальных образцов имел следующие размеры: диаметр 5 мм, длина 120 мм. Лампы испытывались в разрядном контуре: емкость накопительного конденсатора $C=60$ мкФ, энергия разряда $W = 60$ Дж, частота следования токовых импульсов $f = 3,3$ Гц. Для пробоя межэлектродного промежутка использовался последовательный поджиг. Регистрация УФ-излучения проводилась посредством фотодиода ТОСОН С6 (область спектральной чувствительности 0,24–0,28 мкм – диапазон 2), в ИК-диапазоне применялся фоторезистор типа ФСГ (2,0–5,0 мкм – диапазон 1).

Для изучения индикатрисы импульсной лампы нами использовано поворотное устройство, с помощью которого можно оценить энергию излучения в направлении на фотоприемник при повороте источника излучения на любой угол с шагом 10° . Используя метод зональных телесных углов [2] в наших экспериментах для каждого исследуемого спектрального диапазона определялся полный телесный угол по формуле:

$$\Omega = 4\pi \sin \Delta \theta \sum_{\Delta \theta}^{\pi - \Delta \theta} f(\theta) \sin \theta,$$

где $f(\theta)$ – текущее значение индикатрисы для угла θ в относительных единицах. Исследования пространственного распределения проводились при первом включении по истечении 1,0 млн. импульсов.

Результаты исследований. В ходе выполненных исследований подтверждены сделанные

предположения о влиянии испарения оболочки и распыления электродов на характеристики УФ-излучения ламп в течение срока службы. Во-первых, визуальный анализ показал, что в районе катода примерно на одной третьей разрядного промежутка наблюдается желтый и черный налеты. Как показали наши исследования на рентгенофлуоресцентном анализаторе FISCHERSCOPE X-RAY основу образовавшейся пленки составляют молибден и оксид скандия, являющиеся компонентами материала электрода. В центре оболочки появляется белый налет, который является свидетельством испарения кварца в зоне максимума температуры колбы.

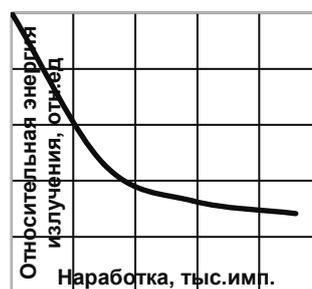


Рисунок 1 – Снижение энергии излучения в спектральном диапазоне 200–300 нм в течение срока службы

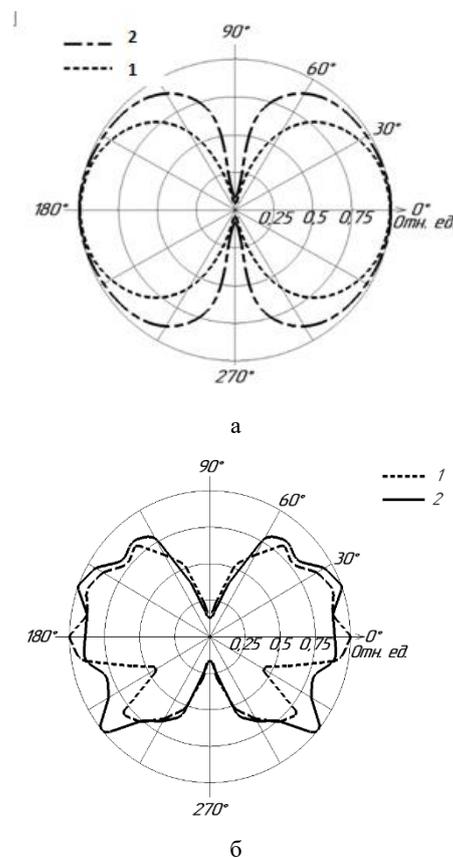


Рисунок 2 – Индикатриса излучения в ИК (1) и УФ-диапазоне (2) в начале испытаний (а) и после 1,0 млн. импульсов тока (б)

Во-вторых, изучение падения интенсивности УФ-излучения (рисунок 1) позволило установить, что данное явление особенно быстро происходит первые 400 тыс. импульсов, после чего зафиксирована некоторая стабилизация дегазационных процессов.

Это явление можно частично объяснить, что взаимодействие плазмы происходит уже не с кварцевым стеклом, а со слоем кристобалита на поверхности.

В-третьих, визуально наблюдаемые напыленные слои пагубно сказываются на индикатрисе излучения импульсной ксеноновой лампы. На рисунке 2 представлено пространственное распределение излучения при первом включении (рисунок 2, а) и после 1,0 млн. вспышек (рисунок 2, б). Представленные на рисунке 2 пространственные распределения излучения позволили сделать следующие выводы:

Размещение ИК-индикатрисы внутри аналогичной кривой для УФ-диапазона связано с более

высоким коэффициентом поглощения плазмы в красной области спектра.

Исходя из рисунка 2, а, расчет эквивалентного телесного угла позволил получить важные для практики величины телесного угла в диапазоне 1 равна $\Omega = 10,37$ ср, а диапазоне 2 – $\Omega = 11,75$ ср.

Описанные явления деградации оболочки существенно искажают индикатрису излучения по истечении 400 тыс. вспышек и приводят к необходимости корректировки времени воздействия УФ-излучения при дезинфицируемой обработке поверхности.

Литература

1. Исследование бактерицидной эффективности обеззараживания воздуха и открытых поверхностей импульсным ультрафиолетовым излучением сплошного спектра / Н.В. Шестопалов [и др.] // Медицинский алфавит. – 2017. – Т. 2, № 18. – С. 5–8.
2. Сапожников, Р. А. Теоретическая фотометрия. – М: Энергия, 1977. – 264 с.

УДК 620.1.08

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ ПРИБОРОВ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ФОРМЫ С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА И PZS-ЛИНЕЙКИ

Епифанцев К. В.¹, Родионов Д. С.²

¹Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

²АО «НИИ «Масштаб»

Санкт-Петербург, Российская Федерация

Адрес для переписки: Епифанцев К. В., Московский пр-т., 149В, г. Санкт-Петербург 196128, Российская Федерация, e-mail: epifancew@gmail.com

Аннотация. Процесс импортозамещения, прежде всего, необходим для быстроизнашиваемых ЗИП приборов, от оперативности их замены зависит работоспособность установки. В статье рассматривается процесс замещения контактного датчика кругломера на оптический датчик лазерного типа, а также в результате этого - потенциальная автоматизация измерения. В качестве экспериментального прибора рассмотрен кругломер RoundTestRA-120p.

Ключевые слова: оптический лазерный датчик, анализ дефектов детали, кругломер.

AUTOMATION OF LASER SYSTEM OF SHAPE DEFECT MEASUREMENT DEVICES USING AN OSCILLOGRAPH AND PZS-RULER

Epifantsev K.¹, Rodionov D.²

¹Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

²JSC "Research Institute "Mashtab"

Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The process of import substitution is primarily necessary for quickly wearing out spare parts for devices, since the operability of the installation depends on the efficiency of their replacement. The article considers the process of replacing the contact sensor of the roundness meter with an optical sensor of the laser type, as well as the resulting potential automation of measurement. The RoundTestRA-120p roundness meter is considered as an experimental device.

Keywords: optical laser sensor, defect analysis of a part, roundness meter.

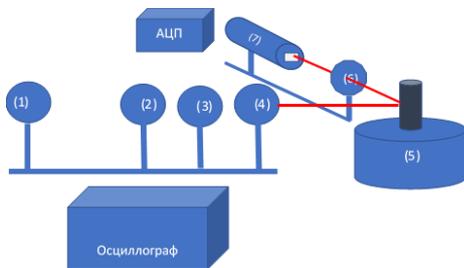
Address for correspondence: Epifantsev K., Moskovsky pr-t., 149V, Saint Petersburg 196128, Russian Federation, e-mail: epifancew@gmail.com

Автоматизация измерений во многом зависит от автоматизации таких процессов, как калибровка и юстировка. Данные процессы максимально трудоемки и определяют наличие методи-

ческой погрешности, аддитивные и мультипликативные поправки. В настоящее время контактный щуп кругломера вынуждает использовать ручной труд при калибровке и терять до 7 мин на 1 деталь

[1–4]. Актуальность исследования – не только импортозамещение, но и увеличение производительности за счет уменьшения времени, затраченного на калибровку в процессе центрирования-выравнивания детали. В исследовании [2] описан процесс создания лазерного кругломера для исследования дефектов формы дорожек качения подшипников, применяемых в авиации. Данное исследование было взято за основной прототип будущей лазерной системы.

В результате экспериментов в Физическом институте Академии наук им П.Н.Лебедева в 2023-2024 гг, была применена PZS линейка K1200ЦЛ-1 на которую через ряд фокусирующих линз, через объектив ГЕЛИОС 40-2 с фокусным расстоянием 85 мм, падал луч, генерируемый диодным лазером ДМ-8-650 (рисунок 1).



1 – лазер ДМ-8-650, 2 – поляризатор; 3 – затемнитель
4 – цилиндрическая линза, 5 – деталь; 6 – объектив Гелиос; 7 – PZS линейка K1200ЦЛ-1

Рисунок 1 – Схема установки



Рисунок 2 – График результатов экспериментов, дюралюминий. На осциллографе установлены микровольты



Рисунок 3 – График результатов экспериментов, конструкционная сталь

В результате проведения измерений было обеспечено четкое устойчивое положение осциллограммы в осциллографе. Осциллограмма перемещалась влево или вправо при перемещении детали микрометрическим винтом, что позволяет говорить о применимости данного метода к определению дефекта формы. Результаты экспериментов на дюралюминии и конструкционной стали приведены на рисунках 2 и 3, соответственно.

Следующая схема установки представлена на рисунке 4. На данной установке был проведен третий ряд экспериментов касательного лазерного пучка. В данном эксперименте не использовался кругломер, не использовалась PZS линейка, а использовался коллиматор. Эксперимент также проводился в АО «Бортовые аэронавигационные системы». В этом эксперименте была применена оптическая схема интерферометра Майкельсона.

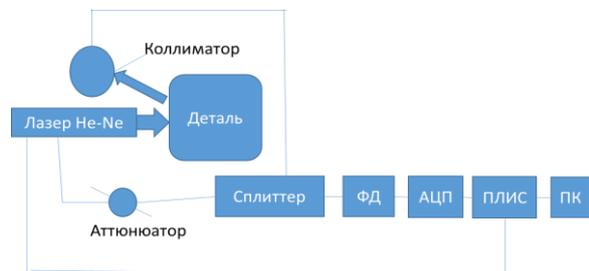


Рисунок 4 – Оптическая схема интерферометра Майкельсона, волоконно-оптическая схема измерительного тракта

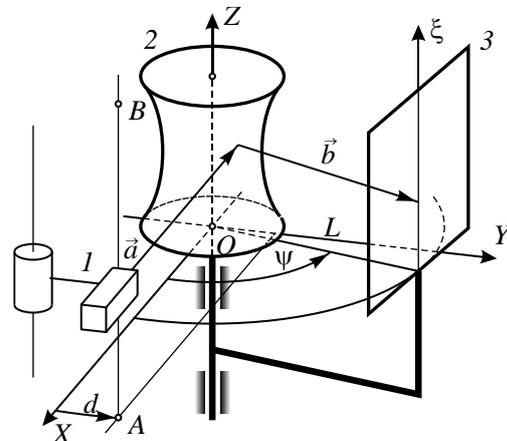


Рисунок 5 – Кинематическая схема [2]

Приведенная оптическая схема соответствует случаю приема излучения на матричный фотоприемник. Разница во взаимном положении зеркал в плечах интерферометра приводит к изменениям положения максимумов интерференции на фотоприемнике.

Также важной частью последующей работы оптического кругломера является обработка круглограммы, которая позволяет вывести на экран в удобном виде полученные результаты, которые могут представлять собой визуализированную круглограмму.

Выводы. В результате измерения по сравнению оригинального прибора с оптическим датчиком были выявлены некоторые зависимости (5). Соотношение микрометрического отклонения и зависимости осциллограммы имеет обратно-пропорциональную зависимость по осям CX и LX, в среднем по зависимости

$$L = 0,1 I = Lf \quad (5)$$

Таким образом, из [2] был взят прототип, который в настоящее время обрабатывается и видоизменен (рисунок 5). Основным элементом, упрощающим и удешевляющим прибор – поворотный стол. Данный стол имеет настройку угла поворота, периода, скорости, самое важное – бюджетную стоимость, что в целом удешевляет установку. Для улучшения фильтрации полученных данных необходимо применить кинематические уравнения и дополнить их динамическими

уравнениями вращательного движения твердого тела в системе координат, связанной с телом, и центр которой находится в центре инерции тела.

Литература

1. Гущина, Е. А. Цифровая метрология: учеб.-метод. Пособие / Е. А. Гущина, К. В. Епифанцев, Н. Ю. Ефремов. – СПб.: ГУАП, 2022. – 104 с.
2. Заякин О., А. Экспериментальный лазерный кругломер, исследование основной погрешности / О. А. Заякин, А. В. Манухин, А. А. Ростов // Известия Самар. науч. центра Российской академии наук. – 2017. – Т. 19, № 6. – С. 184–188.
3. Исследование возможности применения одновиткового вихретокового датчика для измерения дефектов формы / К. В. Епифанцев [и др.] // Инновационное приборостроение. – 2024. – Т. 3, № 1. – С. 63–76.
4. Spragg, R. C. Accurate calibration of surface texture and roundness measuring instruments / R. C. Spragg // Proc. Instr. Mech. Engrs, 1967–1968. – P. 32.

УДК 533.9.082, 533.922, 533.924, 621.373.8

ДВУХИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ МИКРОКОЛИЧЕСТВ МЕТАЛЛОВ В ПОРИСТЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТРИЦАХ

Ермалицкая К. Ф.

*Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Исследованы возможности одноимпульсной и двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии для микроанализа фрагментов почвы и остатков процесса переработки электродов автомобильных аккумуляторов с целью определения остаточного содержания металлических примесей. Экспериментально определены оптимальные параметры лазерных импульсов для увеличения чувствительности анализа, разработана методика количественного анализа пористых неметаллических образцов с микровключениями металлов.

Ключевые слова: Лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия, одиночные и двоянные лазерные импульсы.

DOUBLE-PULSE LASER SPECTROSCOPY OF MICRO AMOUNTS OF METALS IN POROUS NON-METALLIC MATRIXES

Ermalitskaia K.

*Belarussian State University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The possibilities of single-pulse and double-pulse laser atomic emission spectroscopy for microanalysis of soil fragments and residues from the recycling process of automobile battery electrodes in order to determine the residual content of metal impurities were investigated. The optimal parameters of laser pulses to increase the sensitivity of the analysis were experimentally determined, and a method for quantitative analysis of porous non-metallic samples with metal microinclusions was developed.

Key words: Laser atomic emission spectroscopy, single and double laser pulses.

*Адрес для переписки: Ермалицкая К. Ф., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: ermalskaia@gmail.com*

Лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия широко применяется в последние десятилетия для анализа металлов и многокомпонентных сплавов. Однако высокая плотность лазерной мощности на поверхности образца вкупе с малым диаметром лазерного пучка (порядка 100–200 мкм) дает возможность предположить, что данный метод будет

эффективен и для прямого без механической и химической подготовки образца сканирования поверхности пористых неметаллических матриц.

Объектом исследования являлись образцы почв и пористые фрагменты, образовавшиеся после утилизации металлических электродов автомобильных аккумуляторов. При визуальном осмотре в образцах

можно выделить области различного цвета (светило и темно серые, зеленые, черные, светло и темно-красные), размеры которых могут не превышать 0,5–1 мм. Особый интерес представляет возможность сравнения концентраций металлических примесей в данных областях. Несмотря на заявленную высокую чувствительность лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии, концентрации элементов определялись с точностью до единиц процентов – использовать дробные значения процентов неоправдано, так как концентрацию в разных точках отнесенных визуально к одному цвету может значительно отличаться.

Лазерный атомно-эмиссионный спектрометр. Исследования проводились на лазерном двухимпульсном атомно-эмиссионном спектрометре ЛАЭМС (производства кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ) [1]. Основные параметры ЛАЭМС:

- источник возбуждения плазмы – двухимпульсный Nd:YAG-лазер с диодной накачкой, с частотой повторения импульсов $f_{\text{л}} = 10$ Гц и длиной волны $\lambda = 1064$ нм;
- длительность импульсов $\tau_{\text{л}} \approx 10$ нс;
- межимпульсный интервал $\Delta t = 0\text{--}100$ мкс (шаг 1 мкс);
- диапазон анализируемых длин волн $\Delta\lambda = 260\text{--}760$ нм;
- энергия лазерного импульса $E_{\text{имп}} = 10\text{--}100$ мДж.

Специализированное программное обеспечение спектрометра ЛАЭМС позволяет задавать следующие параметры:

- режим одиночных (временной сдвиг между импульсами 0 мкс, т. е. оба импульса воздействуют на поверхность образца одновременно) и двоянных лазерных импульсов (временной интервал между импульсами может изменяться в пределах от 1 до 100 мкс с шагом 1 мкс). Следует отметить, что при использовании ЛАЭМС переход от одиночных к двоянным лазерным импульсам происходит без изменения суммарной энергии и мощности излучения;

– количество импульсов в точку, при этом можно дополнительно задавать количество импульсов преобжига – импульсов, которые воздействуют на поверхность перед основными, но спектр от них не регистрируется. Использование импульсов преобжига необходимо при исследовании образцов, поверхность которых покрыта видимыми загрязнениями, окислами, ржавчиной, патиной;

– энергию двоянных лазерных импульсов и частоту их следования;

– программное обеспечение позволяет перемещать предметный столик с закрепленным образцом в двух плоскостях (вверх-вниз, влево-вправо).

Объекты исследования. Были отобраны 4 образца, отличающиеся внешне, на каждом из образцов было выбрано несколько мест, где проводился лазерный анализ – так, например, в образце

№ 1 визуально можно выделить зеленоватый край толщиной порядка 1 мм, потом прослойку серого цвета, толщиной 2 мм, рыжую полосу толщиной 1 мм и объемную область белого цвета в центре. На первом этапе был проведен качественный анализ – были выявлены основные элементы, присутствующие в каждой точке каждого образца, затем был проведен количественный анализ. Для количественного анализа разрабатывались эталоны с использованием различных типов легкоплавких сплавов (ПОС40, ПОС60, сплав Розе, сплав Вуда, ПОС 90), с последующих их растворением и нанесением на различного типа пористые матрицы (мел, графит, необоженная керамика).

Результаты и обсуждение. Экспериментально было определено, что при лазерной абляции пористых неметаллических матриц с помощью одиночных лазерных импульсов относительная интенсивность спектральных линий металлических включений превышает уровень фона всего в 1,5–2 раза, что не позволяет использовать данный режим для качественного и количественного анализа. При переходе к двухимпульсной лазерной абляции при неизменной суммарной энергии и мощности излучения интенсивность спектральных линий возрастает в 5–7 раз. Оптимальным значением временного интервала между двоянными лазерными импульсами является 8 мкс для всех обнаруженных металлов: меди, железа и олова. Результаты количественного анализа приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Содержание компонентов в неметаллических пористых матрицах, определенное методом двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии

Образец	Цветная область	Ca	Cu	Fe	Sn
		Концентрация, %			
№ 1	Зеленая	79	4	4	13
	Белая	70	4	4	22
	Рыжая	10	10	9	71
	Серая	84	3	4	8
№ 2	Внешняя серая	71	3	10	15
	Зеленая	1	7	8	84
	Красная	23	6	9	61
	Серая	2	7	6	84
№ 3	Светло серая	38	4	1	57
	Темно серая	70	4	0	26
	Черная	59	4	2	35
№ 4	Светло серая	38	4	1	57
	Темно серая	69	4	1	26
	Черная	59	4	2	35
	Светло красная	37	5	6	52
	Светло серая	59	4	7	31
	Темно красная	0	4	6	90
	Темно серая	47	6	13	34

Выводы. На основании проведенных исследований по лазерной атомно-эмиссионной

спектроскопии природных объектов можно сделать следующие выводы:

1. Двухимпульсная лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия является преимущественным методом прямого малодеструктивного анализа металлов и сплавов. Несмотря на то, что данный метод можно использовать для анализа неметаллических матриц, следует отметить, что спектры, получаемые в таких условиях, обладают меньшей интенсивностью по сравнению с чистыми металлами. Это связано с различиями в физических и химических свойствах материалов, влияющих на эффективность ионизации и испускание света. Также хорошо применим для поскольку позволяет проводить измерения в конкретной точке поверхности в атмосфере воздуха без предварительной химической и механической подготовки поверхности.

2. Были определены оптимальные параметры лазерного двухимпульсного лазерного атомно-эмиссионного анализа неметаллических матриц (8 мкс).

3. Переход от одноимпульсной к двухимпульсной лазерной абляции образцов почв приводит к увеличению относительной интенсивности спектральных линий металлических примесей в 5–7 раз, что на порядок ниже, чем при абляции образцов чистых металлов.

4. Визуально отличающиеся цветные области в фрагментах загрязненных почв имеют разную концентрацию примесей: железа, олова и меди.

Литература

1. Лазерный атомно-эмиссионный спектрометр с ахроматической оптической системой / Е. С. Воропай [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2021. – Т. 88, № 3. – С. 486–492.

УДК 535.312:535.016

АНТИБЛИКОВЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОПТИЧЕСКИХ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Жукова М. Н., Парфимович И. Д., Комаров Ф. Ф., Филиппович В. Ю.

НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследовано воздействие низкоэнергетической кислородной плазмы на композиционный материал на основе эпоксидного полимера, наполненного многостенными углеродными нанотрубками, используемого в качестве антибликового. В полете космические аппараты, функционирующие в околоземном космическом пространстве, подвергаются воздействию множества факторов космического пространства: потоков высокоэнергетических электронов и ионов, кислородной плазмы, солнечного излучения, метеорных частиц. В результате такого воздействия возникают различные физико-химические процессы в материалах и элементах оборудования, что приводит к ухудшению их эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, композиционные материалы, эпоксидный полимер, кислородная плазма, антибликовые покрытия.

ANTI-REFLECTIVE COMPOSITE COATINGS FOR PROTECTION OF OPTICAL AND OPTOELECTRONIC SYSTEMS OF SPACECRAFTS

Zhukava M., Parfimovich I., Komarov F., Filippovich V.

A. N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The effect of low-energy oxygen plasma on a composite material based on epoxy polymer filled with multi-walled carbon nanotubes used as an anti-reflective material has been studied. In flight, spacecraft operating in near-Earth space are exposed to a variety of space factors: flows of high-energy electrons and ions, oxygen plasma, solar radiation, and meteor particles. As a result of such impact, various physical and chemical processes occur in materials and equipment elements, which leads to deterioration of their operational characteristics.

Key words: carbon nanotubes, composite materials, epoxy polymer, oxygen plasma, anti-reflective coatings.

Адрес для переписки: Жукова М. Н., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: maryliss.lab@gmail.com

Методика эксперимента. В настоящей работе рассмотрен метод структурирования поверхности материала для создания антиотражающих покрытий посредством использования кислородной плазмы.

Использование многостенных углеродных нанотрубок (УНТ) обусловлено эффективными поглощающими свойствами углеродных нано-

структур и возможностью формировать в полимере объемные поглощающие структуры [1], а также невысокой стоимостью относительно стоимости одностенных УНТ.

Композитный материал формировался на основе полимерной безусадочной эпоксидной смолы торговой марки ЭД-20. В качестве наполнителя использовались углеродные нанотрубки

производства ООО «Наноцентр» (г. Тамбов) с торговым названием «Таунит-М» [2]. Характеристики МУНТ серии «Таунит-М»: внешний диаметр 10–30 нм, внутренний диаметр 5–15 нм, длина более 2 мкм, удельная геометрическая поверхность более 160 м²/г, насыпная плотность 0,025–0,06 г/см³, термостабильность до 600 °С

Облучение атомарным кислородом полимера и композита происходило с помощью плазменно-пучковой установки со следующими параметрами: средняя энергия ионов 20–40 эВ; эффективный флюенс по каптоновому эквиваленту для образцов: $(1,7–30) \cdot 10^{20}$ ат/см² [3]. Для измерения коэффициентов зеркального и диффузного отражения в диапазоне от 0,2 до 2,5 мкм использовался двухлучевой сканирующий спектрофотометр Lambda 1050.

Результаты и обсуждения. Эпоксидная смола была наполнена многостенными углеродными нанотрубками марки «Таунит-М», диаметр которых составляет около 10–20 нм, а длина ≥ 2 мкм. Добавление наполнителей из УНТ приводит к матовой поверхности образцов, увеличению поглощения в видимом и ИК-диапазонах спектра (рисунки 1 и 2). Для оценки устойчивости нанокompозитов к воздействию атомарного кислорода были исследованы морфология поверхности, оптические свойства и структура образцов после обработки в кислородной плазме (КП). Воздействие КП приводит к потере массы и формированию «ковроподобного» рельефа поверхности (рисунок 3). Также приводит к уменьшению диффузного и зеркального отражения и соответствующему увеличению поглощения полимеров, наполненных УНТ. Этот эффект отчетливо проявляется на образцах с различной концентрацией наполнителя «Таунит-М».

Приведенные данные на рисунках 1 и 2 свидетельствуют о том, что формирование развитого эрозионного рельефа приводит к заметному снижению отражательной способности композита с углеродными наполнителями в спектральной области 0,2–2,5 мкм. Низкие коэффициенты диффузного (< 1 %) и зеркального (< 0,02 %) в диапазоне 0,2–2,5 мкм отражения характерны для облученного полимера с наполнителем «Таунит-М».

Исходя из результатов исследования следует, что путем воздействия на полимерные образцы, модифицированные наноразмерными углеродными добавками, плазменными потоками атомарного кислорода на поверхности композитов формируется развитый пространственно-ориентированный микрорельеф (рисунок 3).

Добавление УНТ в полимерную матрицу приводит уменьшению отражения падающего излучения и к сильному структурированию приповерхностной области композита при воздействии потока атомарного кислорода с флюенсом $30 \cdot 10^{20}$ ат·см⁻².

В заключении отметим, что обработка в кислородной плазме приводит к заметному снижению отражательной способности композитов с уг-

леродными наполнителями. Диффузное отражение облученных композитов с наполнителями УНТ в области 0,2–2,5 мкм не превышает 1 %. Соответствующие коэффициенты зеркального отражения меньше 0,02 %.

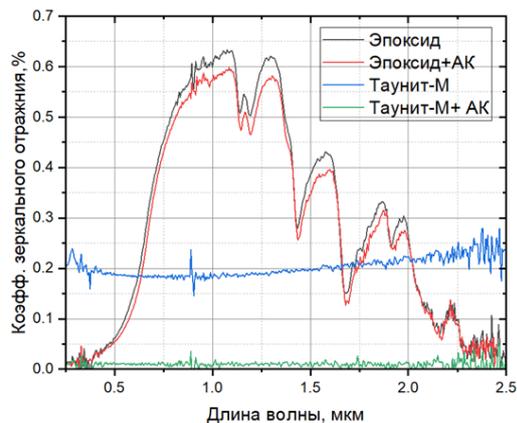


Рисунок 1 – Спектры зеркального отражения эпоксидной смолы и композита до и после облучения атомарным кислородом (АК) в диапазоне (0,2–2,5 мкм)

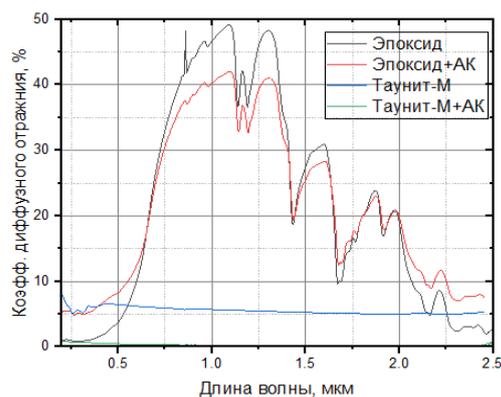


Рисунок 2 – Спектры диффузного отражения эпоксидной смолы и композита до и после облучения атомарным кислородом (АК) в диапазоне (0,2–2,5 мкм)

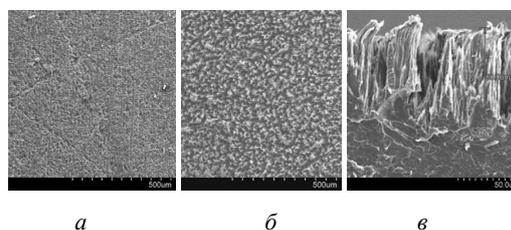


Рисунок 3 – СЭМ-изображения поверхности образца: а – исходная поверхность; б – поверхность после обработки в плазме; в – поперечное сечение образца

Приведенные результаты говорят о перспективности применения данных композитных материалов в качестве антиотражающих поглощающих покрытий в оптических и оптоэлектронных системах как космических аппаратов, так и для наземных применений.

Литература

1. Atomic oxygen exposure effect on carbon nanotubes/epoxy composites for space systems / I. N. Parkhomenko // Acta Astronautica. – 2023. V. 204. – P. 124–131.

2. Эпоксидные композиты, наполненные углеродными нанотрубками и графеном / Е. А. Оводок [и др.].

– Бел. гос. ун-т.-Минск, Нии физико-химических проблем, 2021. – 9 с.

3. Эрозия полимерных нанокомпозитов на основе углеродных нанотрубок под действием кислородной плазмы / Л. С. Новиков [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2016. – № 6. – С. 59–64.

УДК 681.7

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИБОРОВ НАБЛЮДЕНИЯ

Зайцева А. А., Габец В. Л.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Оптическая система – совокупность оптических элементов, созданная для определенного формирования пучков световых лучей, радиоволн, заряженных частиц. В статье рассматриваются типы и разновидности оптических систем, обосновывается необходимость их усовершенствования.

Ключевые слова: оптическая система, оптический микроскоп, бинокль.

IMPROVEMENT OF OPTICAL SYSTEMS OF OBSERVATION DEVICES

Zaitsava A., Habets V.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract: An optical system is a set of optical elements created for the specific formation of beams of light rays, radio waves, and charged particles. The article discusses the types and varieties of optical systems and substantiates the need for their improvement.

Key words: optical system, optical microscope, binoculars.

*Адрес для переписки: Зайцева А. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: ana.zajt2eva@yandex.by*

Оптическая система – совокупность оптических элементов (преломляющих, отражающих, дифракционных и т. п.), созданная для определенного формирования пучков световых лучей (в классической оптике), радиоволн (в радиооптике), заряженных частиц (в электронной и ионной оптике) [1].

Обычно под оптическими системами подразумевают системы, преобразующие электромагнитное излучение в видимом или близких диапазонах (ультрафиолетовый, инфракрасный). В таких системах преобразование пучков света происходит за счет преломления и отражения света, его дифракции и поглощения.

Типы и разновидности оптических систем весьма разнообразны, однако обычно выделяют изображающие оптические системы, которые формируют оптическое изображение и осветительные системы, преобразующие световые пучки от источников света.

Широкое применение оптические приборы получили уже примерно в 1280-х годах в Италии. В технике оптические приборы играют важную роль в различных технических процессах и системах. Например, оптические лазерные системы используются для точной маркировки и обработки материалов. Оптические приборы также применяются в системах навигации, измерения и контроля качества.

Исходя из их назначения, конструкции и технических характеристик, оптические приборы наблюдения можно разделить на следующие основные группы.

Зрительная (подзорная) труба. Основное назначение зрительных труб – это наблюдение за сильно удаленными или малоразмерными объектами с максимально возможным увеличением. Среди зрительных труб редко можно встретить модели с большим диаметром выходного зрачка и большой светосилой, у большинства приборов эти показатели минимизированы, и на первый план выходит такая характеристика как высокая кратность.

Оптический телескоп. Телескоп предназначен для наблюдения удаленных объектов ночного неба. Все существующие телескопы по конструкции можно разделить на две большие группы: зеркальные (рефлекторы) и линзовые (рефракторы). Основные характеристики телескопов: диаметр объектива и увеличение. Чем больше диаметр объектива, тем больше света он соберет, и тем более слабые объекты станут в него видны.

Оптический микроскоп и лупа. Микроскоп – оптический прибор, предназначенный для получения увеличенных изображений того или иного объекта с целью изучения этого объекта. При помощи микроскопа конструкторы определяют

форму, размеры и многие другие параметры для каких-нибудь микроэлементов сложного технического устройства

Оптический монокуляр Монокуляры имеют один окуляр и один объектив. Уступая по качеству изображения биноклям, монокуляры имеют существенное преимущество в размерах по сравнению с ними. Монокуляры применяют, когда необходима минимальная масса прибора при достаточном увеличении и высоком качестве изображения.

Оптический бинокль. Бинокль позволяет наблюдать за удаленными объектами, используя оба глаза. Из-за стереоскопического эффекта существенно повышается удобство и информативность наблюдения и снижается утомляемость глаз по сравнению с наблюдением одним глазом. Различают дневные и ночные оптические бинокли.

Лазерный дальномер. Лазерный дальномер – это электронно-оптический прибор, применяемый для измерения расстояний до объектов. Можно измерить расстояние до любого предмета на местности, находящегося в прямой видимости, с погрешностью около одного метра. Лазерный дальномер может быть выполнен в виде монокуляра или бинокля с увеличением от 2 до 7 крат. Некоторые производители встраивают дальномеры в другие оптические приборы, например, в оптические прицелы [2].

Оптический прицел. Прицел – прибор, который закрепляется на огнестрельном оружии для лучшего наведения оружия на цель. Различают дневные, коллиматорные и ночные оптические прицелы. Дневной оптический прицел представляет собой телескопическую систему, наподобие зрительной трубы, закрепленную на оружии, в одной или нескольких плоскостях изображений которой нанесены специальные метки (сетка), предназначенные для наведения оружия на цель. Использование в конструкции прицела коллиматора обеспечивает высокую скорость прицеливания, раза в 2–3 больше, чем у простых оптических прицелов.

Принцип работы оптической системы приборов наблюдения рассмотрим на примере бинокля

Бинокль (рисунок) состоит из двух телескопов, смонтированных вместе и дающих изображения для обоих глаз. Когда лучи света от далекого объекта проходят через выпуклую линзу, они перекрещиваются. Поэтому далекие объекты, если

рассматривать их через лупу, выглядят перевернутыми. Вторые линзы эту проблему не исправляют. Поэтому в биноклях применяют призмы (объемные стеклянные клинья), которые поворачивают изображение на 180 градусов. Одна призма поворачивает изображение на 90 градусов, и вторая тоже поворачивает на 90 градусов, и таким образом две призмы переворачивают изображение. Призмы могут быть составлены в линию вместе (призмы с крышей) или под углом 90 градусов (призмы Порро).

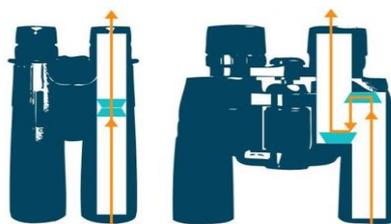


Рисунок – Схема бинокля

Наличие призм объясняет то, почему бинокли такие тяжелые и часто достаточно толстые в середине. Впрочем, есть бинокли без призм, театральные, например. Они невелики по размерам, легкие и компактные, но, к сожалению, имеют невысокое качество изображения. Совершенствование приборов позволяет улучшить их точность, разрешающую способность, прецизионность, линейность, что является важнейшими факторами для использования прибора. Большинство зрительных труб и биноклей дают увеличения значительно меньше максимального полезного увеличения. Повысить увеличение зрительной трубы можно, если на ее главной оптической оси поместить дополнительный окуляр. Зрительная труба строит увеличенное изображение наблюдаемого объекта, которое рассматривается в дополнительный окуляр. Поэтому усовершенствование оптических приборов всегда актуально.

Литература

1. Оптическая система [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc1p/34514>.
2. Лазерные дальномеры, принцип работы и назначение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://myhunt.ru/articles/optics/lazernye-dalnomery-printsip-raboty-i-naznachenie/>.

УДК 681.7

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ПРИБОРАХ НАБЛЮДЕНИЯ

Зайцева А. А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Использование и применение оптических систем является необходимым элементом и атрибутом современности. В статье рассматриваются типы и разновидности оптических систем, обосновывается необходимость их совершенствования.

Ключевые слова: оптическая система, оптический микроскоп, бинокль

OPTICAL SYSTEMS USED IN OBSERVATION DEVICES

Zaitsava A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract: An optical system is a set of optical elements created for the specific formation of beams of light rays, radio waves, and charged particles. The article discusses the types and varieties of optical systems and substantiates the need for their improvement.

Key words: optical system, optical microscope, binoculars

*Адрес для переписки: Зайцева А. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: ana.zajt2eva@yandex.by*

Современная оптическая система представляет собой достаточно сложную сумму элементов, точнее оптических элементов, включающих преломляющиеся, отражающие, дифракционные и т. д. Данная система предназначена для определенного образования пучков световых лучей, например, в классической оптике. В радиооптике – для радиоволн, в электронной и ионной оптике – для заряженных частиц. В подобных системах происходит процесс преобразования пучков света за счет его преломления, отражения, дифракции и поглощения.

Как правило, под оптическими системами понимаются системы, которые преобразуют электромагнитное излучение в аналогично близких диапазонах. Это может быть ультрафиолетовый или красный, например.

Представленные сегодня оптические системы достаточно разнообразны и разнотипны. Это, например, оптические систем, формирующие оптическое изображение, или изображающие оптические системы. Также различают осветительные системы. Это системы, которые направлены на преобразование пучков света от источников.

В современном мире оптические системы нашли свое место. История применения оптических приборов насчитывает не одно тысячелетие.

Использование увеличительных стекол, которые были сделаны из простых кристаллов нам знакомы из истории Ассирии и Вавилона. С периода античности известны закон прямолинейного распространения света и явление преломления света. При этом оптика рассматривалась как часть философского знания.

Периоду активного развития естествознания всегда сопутствовал интерес процессов развития оптики и оптических приборов. Данная сфера знаний обусловлена не только научным интересом.

Она, как правило, предопределена достаточно активным развитием и прогрессом.

Оптика, как раздел физики, всегда являлась объектом активного научного исследования. И дело не в простом научном интересе и возможностях научного исследования. Оптика и ее достижения, развитие и широкое применение как в повседневной жизни, так и в различных сферах жизнедеятельности определяют ее активное исследование и значимость.

Оптика и оптические системы в современном мире прочно заняли лидирующие позиции

Не принимая во внимание значимость оптических приборов и систем в нашей жизненной активности, необходимо отметить их значимость и влияние в технических и технологических аспектах.

Современный техногенный процесс и прогресс невозможен без активного использования и применения оптических систем.

Они используются в различных отраслях промышленного, военного, автомобильного и т. д. производств.

Все известные лазерные оптические системы активно применяются в измерительных приборах для наиболее точной системы маркировки и обработки материалов.

Широко известно применение оптических приборов в навигации, метрологии, системе контроля качества.

Оптические приборы и системы имеют свои особенности и определенные характеристики.

Мы можем различать приборы, которые используются в повседневной жизни. Это фотоаппарат, какие-либо проекторы и т. д. Также различают приборы, которые активно используются и применяются в определенных сферах и отраслях и имеют важное значение для своей сферы применения.

К оптическим наблюдательным приборам можно отнести оптический бинокль, подзорную трубу, оптический телескоп, оптический прицел и т. д. Сегодня следует говорить о наличии оптических систем в приборах наблюдения. Это системы GPS навигации, тепловизоры, камеры обнаружения, компасы и др.

Рассмотрим некоторые из вышеуказанных приборов и систем.

Оптический бинокль. Он дает возможность производить наблюдение за объектами на определенном расстоянии. Причем эта возможность наблюдения, когда реально работают оба глаза.

В этом случае стереоскопический эффект позволяет улучшить качество наблюдения, снижает утомляемость глаз, фактически увеличивая необходимую информированность. наблюдать за удаленными объектами, используя оба глаза. Активно находят применение как ночные, так и дневные бинокли.

Принцип работы оптической системы рассмотрим на примере бинокля

Бинокль состоит из двух телескопов, смонтированных вместе и дающих изображения для обоих глаз. Когда лучи света от далекого объекта проходят через выпуклую линзу, они перекрещиваются. Поэтому далекие объекты, если рассматривать их через лупу, выглядят перевернутыми. Вторые линзы эту проблему не исправляют. Поэтому в биноклях применяют призмы (объемные стеклянные клинья), которые поворачивают изображение на 180 градусов. Одна призма поворачивает изображение на 90 градусов, и вторая тоже поворачивает на 90 градусов, и таким образом две призмы переворачивают изображение. Призмы могут быть составлены в линию вместе (призмы с крышей) или под углом 90 градусов (призмы Порро).

Наличие призм объясняет то, почему бинокли такие тяжелые и часто достаточно толстые в середине. Впрочем, есть бинокли без призм, театральные, например. Они невелики по размерам, легкие и компактные, но, к сожалению, имеют невысокое качество изображения [1].

В качестве следующего оптического прибора рассмотрим оптический прицел. Широко используется и применяется в военной сфере. Прицел – это прибор, который, как правило, закрепляется на огнестрельном оружии, с целью улучшения наведения оружия на цель. Различают дневные, коллиматорные и ночные оптические прицелы.

Из вышеуказанных прицелов некоторые из них (дневные и коллиматорные) могут быть при-

менены в светлое время суток и, соответственно, имеют свои особенности и характеристики.

Оптический телескоп служит для наблюдения за объектами ночного видения, находящимися на удаленном расстоянии.

Как правило оптические телескопы можно классифицировать следующим образом (в соответствии с конструкционными особенностями): зеркальные или рефлекторы и линзовые или рефракторы.

К основным характеристикам телескопа относятся наличие следующих элементов: диаметр объектива и увеличение. Как правило, наиболее значимая характеристика телескопа – это диаметр объектива. Большой диаметр дает возможность более видимости наиболее слабых объектов. Современные телескопы имеют автоматический привод, что дает возможность наблюдения за сложными, удаляющимися объектами.

Следующим прибором может служить лазерный дальномер. Лазерный дальномер – это электронно-оптический прибор, предназначением которого является измерение расстояния до определенного или изучаемого объекта. применяемый для измерения расстояний до объектов.

Он дает возможность определить расстояние до объекта с минимальной погрешностью. Естественно, наиболее точное расстояние измеряется до достаточно крупных объектов, которые обладают высокой отражающей способностью. Худший результат предоставляют мелкие объекты, т. е. те, которые поглощают лазерное излучение наиболее интенсивно [2].

Можно до бесконечности перечислять современные оптические системы, которые используются и активно применяются в приборах наблюдения.

Однако необходимо отметить, что совершенствование приборов позволяет улучшить их точность, разрешающую способность, прецизионность, линейность, что является важнейшими факторами для использования прибора. Поэтому усовершенствование оптических приборов всегда актуально.

Литература

1. Оптическая система [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc1p/34514>.
2. Лазерные дальномеры, принцип работы и назначение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://myhunt.ru/articles/optics/lazernye-dalnomery-printsip-raboty-i-naznachenie/>.

УДК 621

МЕТОДЫ АТМОСФЕРНОЙ КОРРЕКЦИИ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Защепко П. А., Фёдорцев Р. В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Для получения качественных снимков дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) целевая информация (ЦИ), полученная с космических аппаратов, проходит несколько стандартных уровней обработки, одним из которых является атмосферная коррекция (АК). АК выполняется на основе индивидуально разработанных математических моделей и ряда предположений, что подразумевает собой разработку новых комплексных программ и решений. В данной работе описаны основные концепции АК и их существующие исполнения в виде методов и программных обеспечений (ПО). В ходе изучения и анализа существующих методов и алгоритмов АК предлагается продолжение работ по разработке нового метода АК с использованием результатов съемки многоспектрального прибора, работающей синхронно с целевой аппаратурой космического аппарата.

Ключевые слова: атмосферная коррекция, дистанционное зондирование Земли, программное обеспечение, сигнал.

METHODS OF ATMOSPHERIC CORRECTION OF SPACE IMAGES FOR ADVANCED REMOTE SENSING SATELLITES

Zashchepko P., Feodortsau R.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. To obtain high-quality remote sensing (RS) images, the target information (TI) received from spacecraft undergoes several standard levels of processing, one of which is atmospheric correction (AC). AC is performed on the basis of individually developed mathematical models and a number of assumptions, which implies the development of new complex programs and solutions. This paper describes the basic concepts of AC and their existing implementations in the form of methods and software (SW). In the course of studying and analyzing existing AC methods and algorithms, it is proposed to continue the work on the development of a new AC method using the results of multispectral instrument imaging, operating synchronously with the target spacecraft hardware

Key words: atmospheric correction, remote sensing, software, signal.

Адрес для переписки: *Защепко П. А., ул. Я. Коласа, 22 к.1, г. Минск 220013, Республика Беларусь*
e-mail: *bntu@bntu.by*

Концепция АК. Атмосферная коррекция космических снимков является одной из важных проблем ДЗЗ. Ее основная задача – восстановление альbedo Земной поверхности. На основе теории переноса излучения, формируемый сигнал представляет собой суперпозицию сигналов от атмосферы и подстилающей поверхности. Со стороны атмосферы основными факторами искажающий сигнал от земной поверхности являются аэрозольное («нестабильный» фактор – аэрозольная оптическая толщина, АОТ) и молекулярное («стабильный» фактор – рэлеевское рассеяние) рассеяние, а также поглощение газами и парами воды в атмосфере [1].

Общий вид переноса излучения от поверхности Земли к оптико-электронной аппаратуре (ОЭА) космического аппарата ДЗЗ представлен на рисунке 1.

Коррекции снимков заключается в следующем. Первым этапом обработки является их радиометрическая коррекция – пересчет «сырых» значений пикселей (DN) в значения спектральной плотности энергетической яркости $L_{e\ TOA}$ (СПЭЯ) на верхней границе атмосферы.

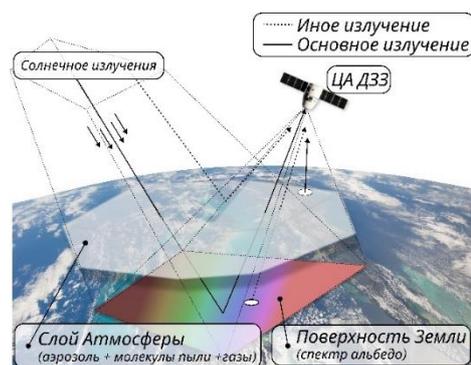


Рисунок 1 – Представление передачи сигнала в атмосфере

Стандартная формула радиометрической коррекции приведена в ГОСТ Р 59759-2021 и имеет вид [2]:

$$L_{e\lambda\ TOA} = A_{\lambda} DN_{\lambda} + B_{\lambda}, \quad (1)$$

где, A_{λ} – спектральный коэффициент преобразования опорного цифрового детектора; DN_{λ} – значение цифрового отсчета пикселя в заданном спектральном канале; прошедшее относительную

радиометрическую коррекцию; B_λ – спектральный коэффициент смещения опорного цифрового детектора.

После проведения радиометрии следующим этапом обработки реализуется атмосферная коррекция [2]:

$$\rho_{\lambda TOA} = \rho_{\lambda R+A} + \frac{\alpha_\lambda}{1 - \langle \rho_{\lambda TOC} \rangle S_\lambda} \rho_{\lambda TOC} + \frac{\beta_\lambda}{1 - \langle \rho_{\lambda TOC} \rangle S_\lambda} \langle \rho_{\lambda TOC} \rangle,$$

где, $\rho_{\lambda TOA} = \frac{\pi L_{e\lambda TOA} d^2}{E_{\lambda TOA} \mu_0}$ – альbedo на верхней границе атмосферы; $\rho_{\lambda R+A}$ – альbedo атмосферы без учета влияния Земли; α_λ и β_λ – модельные параметры атмосферы для заданного спектрального канала; $\langle \rho_{\lambda TOC} \rangle$ – среднее значение альbedo пикселя в заданном спектральном канале, отнесенном к Земле; S_λ – сферическое альbedo атмосферы.

Параметры α_λ и β_λ подразумевают необходимость заранее выстроенной математической модели атмосферы (АОТ, содержание воды в атмосфере и рэлеевское рассеяние), на основе которой и будут рассчитываться альbedo поверхности Земли.

Реализации АК. Выше рассмотренная методика расчета может использоваться для проектирования индивидуальной модели АК конкретной системы ДЗЗ. На её основе были разработаны как простые, так и более сложные методы.

Существуют стандартизированные методы АК, указанные в ГОСТ Р 70027–2022 [3]. Их разделяют на следующие типы и подтипы:

1) эмпирическая АК:

способ коррекции по плоскому полю. Требуется наличие плоского спектра на заданном фрагменте съемки. Недостаток: присутствие на заданном фрагменте съемки участков с резкими перепадами в яркостях отдельных каналов приводит к ошибке в коррекции;

способ коррекции по методу эмпирической линии. Требуется наличие известных истинных значений яркости темного и светлого объектов;

коррекция по темному объекту. Требуется наличие на заданном фрагменте съемки темных объектов. Недостаток: возможное появление перекорректированных данных.

2) АК на основе физической модели. Требуется наличие параметров атмосферы на момент съемки.

Каждый из эмпирических методов является упрощенным и не предназначен для обеспечения высокой точности коррекции.

АК основанная на физической модели, часто используется для формирования более сложных программных модулей, например:

Для КА ДЗЗ Landsat используется известный метод АК разработанный Чавезом в 1988 году [4], который реализован во внутреннем пакете Land-

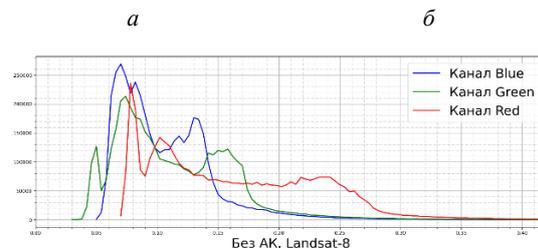
sat для обработки ЦИ уровня L1 [5]. Данная методика использует заранее заданные параметры атмосферы, что сильно сказывается на точность корректирования.

Для обработки ЦИ WorldView-3 используют запатентованный метод АК DG AComp [6]. Данный модуль смягчает эффекты рассеивания световой волны, вызванного дымкой, водяными парами и твердыми частицами в атмосфере.

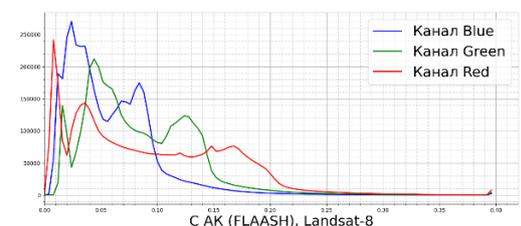
Для КА ДЗЗ Sentinel-2 существует отдельный модуль АК Sen2Cor, который реализован в ПО SNAP [7]. Данный модуль является международно-признанным и может использоваться в качестве эталона сравнения с заранее установленными точностными рамками.

Методы АК Sentinel-2 и WorldView-3 основаны использованием как информации об атмосфере полученной ОЭА, так и априорно заданных параметров об атмосфере, что усложняет процесс АК.

Вышеизложенные модули являются частными проектами, которые используются для определенного вида аппарата. В качестве альтернативы, были разработаны отдельно существующие ПО, где реализованы модули АК. К таким модулям можно отнести: ПО ENVI с встроенным модулем атмосферной коррекции FLAASH [8], модуль 6S и модуль ATCOR [9].



а



z

а – без АК; б – с АК; в – гистограммы альbedo Земли без АК; z – гистограммы альbedo Земли с АК

Рисунок 2 – Пример работы метода АК

Модуль FLAASH является наиболее распространенным инструментом АК. Им могут пользоваться для обработки ЦИ таких аппаратов ДЗЗ, как: Landsat, Sentinel-2, KOMPSAT, IKONOS, GeoEye, WorldView и других систем. В нем реализовано атмосферное корректирование как мультиспектральных, так и гиперспектральных снимков. В случае обработки пользовательской ЦИ, имеется возможность создания собственных файлов внутри программы и изменения настроек АК. Даже если рабочей информации по спектральному каналу будет не хватать для проведения полной АК, ее можно будет заменить на приблизительно равную с учетом потерь по точности коррекции.

Пример работы Модуля FLAASH при обработке снимка Landsat-8 приведен на рисунке 2. Как видно по гистограммам, при проведении АК спектральная информация в разных каналах меняется в зависимости от степени влияния соответствующих им факторов.

Таким образом, каждый из рассмотренных и допустимых для использования методов АК имеет привязку к специальным рабочим каналам ОЭА и требуют знания параметров атмосферы.

Требования к разработке метода АК. Учитывая вышеизложенные факторы можно вывести первичные требования для реализации АК при проектировании новой ОЭА ДЗЗ:

- использовать при съемках ОЭА дополнительный прибор (зондировщик), по информации, полученной с которого, можно определить параметры атмосферы;
- нестабильными параметрами атмосферы являются АОТ и концентрация паров воды. В соответствии с этим сформировать спектральные диапазоны для зондировщика;
- разработать метод определения по информации с зондировщика нестабильных параметров атмосферы (АОТ и концентрация паров воды);
- разработать метод использования полученных параметров при АК снимков ОЭА;
- внедрить в ПО обработки снимков ОЭА разработанный модуль АК для синхронной коррекции.

Вывод. Таким образом, были рассмотрены общая концепция АК и наиболее распространенные способы проведения АК. Предлагается продолжение работ по разработке нового метода АК с использованием результатов съемки мультиспектрального прибора, работающей синхронно с целевой аппаратурой космического аппарата.

Литература

1. Шовенгердт, Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.
2. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Радиометрическая коррекция данных дистанционного зондирования Земли из космоса, получаемых с космических аппаратов опτικο-электронного наблюдения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне. Требование к алгоритмам: ГОСТ Р 59759-2021. – Введ. 01.05.2022. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 24 с.
3. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Виды атмосферной коррекции: ГОСТ Р 70027-2022. – Введ. 01.09.2022. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 12 с.
4. Chavez, P. S. Image-based atmospheric corrections – Revisited and Improved / P. S. Chavez // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1996. –V. 62, № 9. – P. 1025–1036.
5. Забелин, С. А. Методика атмосферной коррекции снимков Landsat / С. А. Забелин, А. Д. Тулегулов, // Вестник Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева. – 2011. – № 2 (81). – С. 147–154.
6. Smith, M. J. (2015). A comparison of DG AComp, FLAASH and QUAC atmospheric compensation algorithms using WorldView-2 Imager, Environmental Science, Engineering. – 2015.
7. Main-Knorn M. Sen2Cor for Sentinel-2, in: Image and SignalProcessing for Remote Sensing XXIII, SPIE Digital Library, – 2017.
8. Болсуновский, М. А., Атмосферная коррекция в ПО ENVI. Модуль FLAASH / М. А. Болсуновский, А. С. Черепанов– М.: Геопрофи, 2006 – 3 с.
9. Benthic Habitat Mapping Using Multispectral High-Resolution Imagery: Evaluation of Shallow Water Atmospheric Correction Techniques, Sensors / E. Francisco [et al.]. – NIH, 2017, – 23 p.

УДК 621.391.63;535.361

МЕТОД ЛАЗЕРНО-ЛОКАЦИОННОГО ПОЛУЧЕНИЯ 3D ПОРТРЕТОВ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ С КВАЗИНУЛЕВЫМ ОПТИЧЕСКИМ КОНТРАСТОМ ПОВЕРХНОСТИ**Иванов В. И.***НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрен метод лазерно-локационного получения рельефометрических сигнатур высокодинамичных малоразмерных объектов с квазиулевым оптическим контрастом поверхности. Метод позволяет существенно уменьшить число вычислительных операций, упростить программное обеспечение и юстировку и тем самым повысить быстродействие и надежность функционирования флэш-лидара.

Ключевые слова: флэш-лидар, распознавание объектов с квазиулевым оптическим контрастом/

METHOD OF LASER-LOCATION OBTAINING 3D PORTRAITS OF SMALL-SIZE OBJECTS WITH QUASI-ZERO OPTICAL SURFACE CONTRAST**Ivanov V.***Institute for nuclear problems of BSU
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The paper considers a method of laser-location obtaining relief-metric signatures of highly dynamic small-sized objects with quasi-zero optical contrast of the surface. The method allows to significantly reduce the number of computational operations, simplify the software and adjustment and thereby increase the speed and reliability of the flash lidar

Keywords: flash lidar, recognition of objects with quasi-zero optical contrast.

*Адрес для переписки: Иванов В. И., ул. Бобруйская 11, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: ivanov.inp@gmail.com*

Достоверность дистанционного обнаружения и распознавания объектов во многом определяется оптическим (яркостным) контрастом поверхности объекта

$$\Delta K = K_1 - K_2, \quad (1)$$

где K_1 – коэффициента отражения поверхности объекта или элемента поверхности; K_2 – коэффициент отражения некоторой фоновой поверхности или соседнего элемента поверхности.

На практике для определения контраста δ_k , используются относительные величины, например, в виде отношений [1]

$$|\delta_k| = (K_i - K_j)/K_j = \pm \Delta K/K_j, \quad (2)$$

$$|\delta_k| = \pm \Delta K/\bar{K}; \quad (3)$$

где \bar{K} – среднее значение коэффициента отражения.

Величина ΔK определяет разность отраженных сигналов

$$\Delta V = P \Delta K, \quad (4)$$

где P – мощность лазерного излучения, падающего на поверхность объекта.

Из (4) следует, что при $\Delta K \rightarrow 0$, для любых значений мощности P , $\Delta V \rightarrow 0$, т. е. обнаружение и различение объектов с квазиулевым контрастом δ_k , т. е. с контрастом менее некоторого порогового (шумового) контраста $\delta_k \leq \delta_{kp}$, по отраженной мощности зондирующего излучения практически невозможно [1, 2]. Искусственное

снижение оптического контраста объектов является эффективным приемом их маскировки. Однако сохраняющиеся при этом объемность, форма и рельеф поверхности объекта S являются существенными демаскирующими признаками. В этой связи получение информации о рельефометрической сигнатуре поверхности объекта (3D портретов) объектов $\xi_i(S)$ (где ξ_i – глубина рельефа поверхности S в i -той точке) является доминирующим фактором повышения эффективности обнаружения и распознавания объектов с квазиулевым контрастом, в частности, с использованием лидарных систем типа (Flash-LIDAR) [3–5],

Применение флэш-лидаров на базе многопиксельных матричных фотодетекторов с интегрированными процессорами многоканальных времяпролетных измерений обеспечивает высокое быстродействие получения рельефометрических сигнатур объекта $\xi_i(S)$ одновременно на большом множестве N точек поверхности без оптико-механического сканирования.

Предлагаемый метод определения рельефометрических сигнатур $\xi_i(S)$ слабоконтрастных объектов основан на получении и обработке только одного а не двух [3–5] 2D распределений энергии отраженного лазерного излучения.

По выходному сигналу точечного фотодетектора с калиброванной чувствительностью определяется интегральное значение энергии отраженного поля

$$B_0(S) = |E_i(S)|^2 \int_{t_1}^{t_1 + 2\tau_p} f^2(t - \tau_p) dt = |E_k(S)|^2, \quad (5)$$

где t_1 – момент начала прихода отраженного сигнала по отношению к моменту излучения лазерного импульса t_0 ; τ_p – длительность излучаемого импульса

$$\tau_p \geq 2\xi_{max}/C, \quad (6)$$

где ξ_{max} – максимальная глубина рельефа поверхности заданного класса объектов; C – скорость света.

$B_0(S)$ представляет собой сумму энергий всех N парциальных пучков $B_{0i} = P_i K_i F_p \tau_p$, отраженных от N элементарных площадок ΔS_i поверхности S

$$B_0(S) = \sum_{i=1}^n B_{0i} = F_p \tau_p \sum_{i=1}^n P_i K_i. \quad (7)$$

При равномерном распределении мощности зондирующего лазерного излучения по поверхности S среднее значение энергии парциального пучка определяется уравнением

$$\bar{B}_0 = B_0(S)/n = P_1 F_p \tau_p \sum_{i=1}^n K_i/n = P_1 F_p \tau_p \bar{K}, \quad (8)$$

Получаемое аналогично [5] 2D распределение отраженного излучения $B_1(S)$ имеет вид

$$\begin{aligned} B_1(S) &= |E_i(S)|^2 \int_{t_1}^{t_1+\tau_p} f^2(t - \tau_i) dt = \\ &= |E_i(S)|^2 (\tau_p - \tau_i); \end{aligned} \quad (9)$$

Поэлементное отношение энергий 2D распределения $B_1(S)$ к \bar{B}_0 (8), равно

$$B_{1i}/\bar{B}_0 = (\tau_p - \tau_i) K_i / \tau_p \bar{K} = (\tau_p - \tau_i) k_i / \tau_p, \quad (10)$$

где

$$k_i = K_i / \bar{K}. \quad (11)$$

В соответствии с (9) при $k_i = 1$ истинные значения τ_i , ξ_i определяются уравнениями

$$\tau_i = \tau_p (1 - B_{1i}/\bar{B}_0), \quad (12)$$

$$\xi_i = 0,5 C \tau_i = 0,5 C \tau_p (1 - B_{1i}/\bar{B}_0). \quad (13)$$

Однако отношение B_{1i}/\bar{B}_0 (10), зависит от отражательных характеристик объекта (коэффициент k_i), значение которого в большинстве случаев, неизвестно. Следовательно получаемые оценки τ'_i , ξ'_i отличаются от истинных значений τ_i , ξ_i (12), (13)

$$\tau'_i = \tau_p (1 - B_{1i}/\bar{B}_0 k_i) = \tau_p [1 - B_{1i}/\bar{B}_0 (1 \pm \delta_{ki})], \quad (14)$$

$$\xi'_i = 0,5 C \tau_p \tau'_i, \quad (15)$$

где

$$k_i = K_i / \bar{K} = (\bar{K} \pm \Delta K_i) / \bar{K} = 1 \pm \delta_{ki}, \quad (16)$$

δ_{ki} – оптический контраст поверхности (3).

Абсолютное значение методической погрешности времени запаздывания i -того парциального пучка $\Delta\tau_i$, а соответственно $\Delta\xi_i$, определяются уравнениями

$$|\Delta\tau_i| = \tau'_i - \tau_i = \tau_p [(B_{1i}/\bar{B}_0) (\pm \delta_{ki} / (1 \pm \delta_{ki}))], \quad (17)$$

$$|\Delta\xi_i| = 0,5 C \tau_p |\Delta\tau_i| = (0,5 C \tau_p - \xi_i) (\pm \delta_{ki} / (1 \pm \delta_{ki})). \quad (18)$$

Согласно (18) погрешность определения глубины рельефа $\Delta\xi_i$ возрастает с увеличением оптического контраста поверхности объекта (степени неоднородности коэффициента отражения поверхности); $\Delta\xi_i = 0$ при $\delta_{ki} = 0$.

Учитывая статистический характер флуктуаций коэффициента отражения поверхности в пределах $\pm \Delta K_i$ относительно среднего значения \bar{K} , коэффициенты отражения K_i элементарных площадок ΔS_i поверхности S можно представить независимыми случайными величинами с равномерным законом распределения в диапазоне $\Delta K = 2\Delta K = K_{max} - K_{min}$; $\bar{K} = 0,5(K_{min} + K_{max})$. Среднеквадратичное отклонение (СКО) коэффициента отражения σ_k определяется в этом случае уравнением

$$\sigma_k = \Delta K / \sqrt{12}. \quad (19)$$

На основании (19) СКО оптического контраста (3) запишем в виде

$$\sigma_{\delta_k} = \sigma_k / \bar{K} = \delta_k / \sqrt{12}. \quad (20)$$

С учетом (20) среднеквадратичное значение методической погрешности оценки глубины рельефа, согласно уравнению (18), определяется уравнением

$$\sigma_{\xi_i} = (0,5 \tau_p C - \xi_i) (\delta_{ki} / (\delta_{ki} + \sqrt{12})). \quad (20)$$

Для объектов с квазиулевым оптическим контрастом

$$\delta_k \leq \delta_{kp} = 0,02, \quad (21)$$

где $\delta_{kp} = 0,02$ – пороговый контраст (2 %) зрительного различения деталей объекта [1, 2].

С учетом (21) для объектов с квазиулевым контрастом σ_{ξ_i} определяется величиной

$$\sigma_{\xi_i} \leq (0,5 \tau_p C - \xi_i) 0,00574. \quad (22)$$

При высоком оптическом контрасте, например $\delta_{ki} = 0,1$ (10%), $\sigma_{\xi_i} \leq (0,5 \tau_p C - \xi_i) 0,028$. Согласно (22) погрешность σ_{ξ_i} пропорционально возрастает с увеличением оптического контраста δ_k и линейно уменьшается с увеличением глубины рельефа ξ . При этом погрешность σ_{ξ_i} тем меньше, чем меньше оптический контраст поверхности объекта δ_k . Для большинства объектов с квазиулевым оптическим контрастом $\delta_k \leq 0,02$ данной погрешностью можно пренебречь. Так, например, при $\delta_k \approx 0,02$ и диапазоне глубины рельефа от 1 до 300 см σ_{ξ_i} изменяется от 1,7 см до 0,05 мм.

Предложенный метод наряду с обеспечением высокой точности определения рельефометрических сигнатур слабоконтрастных объектов позволяет существенно уменьшить число вычислительных операций, упростить программное обес-

печение и юстировку и тем самым повысить быстродействие и надежность функционирования флэш-лидара.

Литература

1. Zege, E. P. Image Transfer through a Scattering Medium / E. P. Zege, F. P. Ivanov, I. L. Katsev. – Verlag, Berlin, 1991.

2. Ivanov, V. I. Method creasing the efficiency of laser active-pulsed vision systems for obyects wich quasi-zero optical contrast / V. I. Ivanov, N. I. Ivanov // J. Appl. Spectr. – 2022. – V. 89 (6).

3. Time of Flight Cameras: Principles, Methods, and Applications / M. Hansard [et al.]. – Springer, 2012.

4. Ivanov, V. I. Methodology and algorithms for obtaining long-range 3D portraits of objects based on 2D intensity distributions of truncated realizations of reflected laser radiation / V.I. Ivanov // Computer Optics. – 2024. – V. 48, № 3. – P. 386–396.

5. Иванов, В. И. Метод увеличения дальности действия флэш – лидара на основе матричного фотодетектора с накоплением зарядов пикселов / В. И. Иванов // В настоящем сборнике.

УДК 621.391.63;535.361

МЕТОД УВЕЛИЧЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ФЛЭШ-ЛИДАРА НА ОСНОВЕ МАТРИЧНОГО ФОТОДЕТЕКТОРА С НАКОПЛЕНИЕМ ЗАРЯДА ПИКСЕЛОВ Иванов В. И.

*НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрен метод увеличения дальности флэш-лидара для определения рельефометрических сигнатур дальностных объектов, позволяющий существенно повысить коэффициент эффективности использования зондирующего лазерного излучения и тем самым в десятки и сотни раз увеличить их дальность действия по сравнению с флэш-лидарами на основе ToF технологии «Range gated imagers».

Ключевые слова: флэш-лидар, рельефометрическая сигнатура, дальность.

METHOD FOR INCREASING THE RANGE OF FLASH LIDAR BASED ON A MATRIX PHOTO DETECTOR WITH PIXEL CHARGE ACCUMULATION

Ivanov V.

*Institute for nuclear problems of BSU
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The article considers a method for increasing the range of a flash lidar for determining relief-metric signatures of long-range objects, which allows to significantly increase the efficiency coefficient of using probing laser radiation and thereby increase their range by tens and hundreds of times compared to flash lidars based on ToF technology “Range gated imagers”.

Keywords: flash lidar, relief-metric signature, range.

*Адрес для переписки: Иванов В. И., ул. Бобруйская 11, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: ivanov.inp@gmail.com*

Обеспечение высокой вероятности правильного обнаружения и распознавания высокочастотных слабоконтрастных объектов во многих случаях требует получения рельефометрических сигнатур (3D портретов) объектов $\xi_i(S)$ (где ξ_i – глубина рельефа поверхности S в i -той точке) лазерно-локационными методами [1, 2]. Необходимое при этом высокое быстродействие и широкоапертурный захват объекта достигается применением специальных лидаров – флэш-лидаров (Flash-LIDAR) на базе многопиксельных матричных TOF-камер с интегрированными процессорами многоканальной обработки, которые обеспечивают получение рельефометрических сигнатур объекта одновременно на большом множестве N точек его поверхности S без оптико-механического сканирования [2–5].

Согласно ToF технологии «Range gated imagers» [5] для каждого пиксела фотоматрицы ToF

осуществляется определение энергии отраженных сигналов, пропорционально времени запаздывания парциальных пучков отраженного излучения $\tau_i(S, t)$, в виде электрических зарядов на МДП – конденсаторах пиксела. Заряд конденсаторов каждого пиксела осуществляется во временных строках длительностью τ_{si} , равной времени запаздывания парциальных пучков относительно моментов излучения лазерных импульсов. Причем, длительность лазерных импульсов должна удовлетворять условию [5]

$$\tau_{p,ToF} \geq 2R_{max}/C, \quad (1)$$

где R_{max} – максимальное расстояние до точки поверхности объекта от лидара; C – скорость света.

Как следует из уравнения (1), необходимая длительность $\tau_{p,ToF}$, а соответственно энергия зондирующих импульсов увеличивается с увеличением дальности R , что существенно ограничи-

вает дальность действия TOF-лидара при приемлимых весогабаритных характеристиках и энергетическом потенциале.

В соответствии с предлагаемым методом длительность зондирующих импульсов τ_p определяется в виде [2]

$$\tau_p \geq 2\xi_{max}/C, \quad (2)$$

где ξ_{max} – максимальная глубина рельефа поверхности заданного класса объектов.

При этом, в отличие от ToF технологии «Range gated imagers», одновременное определение $\tau_i(S, t)$, а соответственно и $\xi_i(S)$, на множестве элементов N поверхности S основано на получении двумерных распределений энергии $B_1(S)$ – «алгоритм 1» или $B_2(S)$ – «алгоритм 2», а также $B_0(S)$ на усеченных по времени реализациях отраженного светового поля $E(S, t)$ путем одновременного накопления заряда отраженного поля $E(S, t)$ во всех N пикселях фотоматрицы в пространственно – временном стробе с длительностью, равной длительности лазерных импульсов $\tau_{s1} = \tau_{s2} = \tau_p$. Причем накопление зарядов осуществляют на интервале $(t_1, t_1 + \tau_p)$ для поля, который включает часть реализации отраженного поля с передним фронтом $B_1(S)$, или на интервале $(t_1 + \tau_p, t_1 + 2\tau_p)$ – для части реализации поля с задним фронтом $B_2(S)$, а также распределение энергии для полной реализации отраженного сигнала $B_0(S)$, т. е. на интервале $(t_1, t_1 + 2\tau_p)$, где t_1 – момент времени, соответствующий началу прихода отраженного сигнала по отношению к моменту излучения лазерного импульса t_0 .

В результате преобразования выходных сигналов пикселей получаем 2D-распределения энергии поля отраженного излучения $E(S, t)$ [3, 4]:

$$\begin{aligned} B_1(S) &= |E_i(S)|^2 \int_{t_1}^{t_1+\tau_p} f^2(t - \tau_i) dt = \\ &= |E_i(S)|^2 (\tau_p - \tau_i), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} B_2(S) &= |E_i(S)|^2 \int_{t_1+\tau_p}^{t_1+2\tau_p} f^2(t - \tau_i) dt = \\ &= |E_i(S)|^2 \tau_i, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} B_{0i}(S) &= |E_i(S)|^2 \int_{t_1}^{t_1+2\tau_p} f^2(t - \tau_p) dt = \\ &= |E_i(S)|^2 \tau_p. \end{aligned} \quad (5)$$

Согласно уравнений (3)–(5) энергии парциальных пучков, отраженных от одного и того же i -того элемента поверхности ΔS_i соответственно равны:

$$B_{1i} = P_i F_{pi} (\tau_p - \tau_i) = P_i K_i T_{ai} A_i (\tau_p - \tau_i), \quad (6)$$

$$B_{2i} = P_i F_{pi} \tau_i = P_i K_i T_{ai} A_i \tau_i, \quad (7)$$

$$B_{0i} = P_i F_{pi} \tau_p = P_i K_i T_{ai} A_i \tau_p, \quad (8)$$

где P_i – мощность падающего лазерного излучения на i -тый элемент поверхности объекта ΔS_i с коэффициентом отражения K_i ; F_{pi} – оператор преобразования для i -того парциального пучка.

Получение информации о рельефе поверхности объекта в виде рельефометрических сигнатур дальностных объектов $\xi_i(S)$ обеспечивается путем определения отношений энергий в виде $B_1(S)/B_0(S)$ или $B_2(S)/B_0(S)$.

Согласно уравнений (6)–(8), отношения энергий i -тых парциальных пучков, отраженных от одного и того же i -того элемента поверхности ΔS_i с коэффициентом отражения K_i определены в виде:

$$B_{1i}/B_{0i} = (\tau_p - \tau_i)/\tau_p, \quad (9)$$

$$B_{2i}/B_{0i} = \tau_i/\tau_p. \quad (10)$$

Искомые параметры τ_i , ξ_i определяем из (9) – «алгоритм 1» или (10) – «алгоритм 2»:

$$\tau_i = \tau_p [1 - (B_{1i}/B_{0i})],$$

$$\xi_i = 0,5C\tau_i = 0,5C\tau_p [1 - (B_{1i}/B_{0i})]. \quad (11)$$

$$\tau_i = \tau_p (B_{2i}/B_{0i}),$$

$$\xi_i = 0,5C\tau_i = 0,5C\tau_p (B_{2i}/B_{0i}). \quad (12)$$

С учетом уравнений (11), (12) рельефометрическая сигнатура поверхности объекта $\xi_i(S)$ по алгоритмам 1 и 2 определяется уравнениями (13), (14) соответственно:

$$\xi(S) = 0,5C\tau_p [1 - (B_1(S)/B_0(S))], \quad (13)$$

$$\xi(S) = 0,5C\tau_p [B_2(S)/B_0(S)]. \quad (14)$$

Коэффициент повышения эффективности использования энергии лазерного излучения n_R в предлагаемом методе определяется отношением уравнений (1) к (2)

$$n_R = \tau_{p,TOF}/\tau_p = R_{max}/\xi_{max}. \quad (15)$$

Из данного уравнения следует, что при равной энергии зондирующих импульсов $E_{TOF} = P_{0,TOF}\tau_{p,TOF} = E_p = P_{0,p}\tau_p$ импульсная мощность лазерных импульсов $P_{0,p}$ по предлагаемой методологии в n_R раз больше момента времени, соответствующий началу прихода отраженного сигнала по отношению к моменту излучения лазерного импульса t_0 .

В результате преобразования выходных сигналов пикселей получаем 2D распределения энергии поля отраженного излучения $E(S, t)$ [3, 4]:

$$\begin{aligned} B_1(S) &= |E_i(S)|^2 \int_{t_1}^{t_1+\tau_p} f^2(t - \tau_i) dt = \\ &= |E_i(S)|^2 (\tau_p - \tau_i), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} B_2(S) &= |E_i(S)|^2 \int_{t_1+\tau_p}^{t_1+2\tau_p} f^2(t - \tau_i) dt = \\ &= |E_i(S)|^2 \tau_i, \end{aligned} \quad (4)$$

$$B_{0i}(S) = |E_i(S)|^2 \int_{t_1}^{t_1 + 2\tau_p} f^2(t - \tau_p) dt = |E_i(S)|^2 \tau_p. \quad (5)$$

Согласно уравнений (3)–(5) энергии парциальных пучков, отраженных от одного и того же i -того элемента поверхности ΔS_i соответственно равны:

$$B_{1i} = P_i F_{pi} (\tau_p - \tau_i) = P_i K_i T_{ai} A_i (\tau_p - \tau_i), \quad (6)$$

$$B_{2i} = P_i F_{pi} \tau_i = P_i K_i T_{ai} A_i \tau_i, \quad (7)$$

$$B_{0i} = P_i F_{pi} \tau_p = P_i K_i T_{ai} A_i \tau_p, \quad (8)$$

где P_i – мощность падающего лазерного излучения на i -тый элемент поверхности объекта ΔS_i с коэффициентом отражения K_i ; F_{pi} – оператор преобразования для i -того парциального пучка.

Получение информации о рельефе поверхности объекта в виде рельефометрических сигнатур дальностных объектов $\xi_i(S)$ обеспечивается путем определения отношений энергий в виде $B_1(S)/B_0(S)$ или $B_2(S)/B_0(S)$.

Согласно уравнений (6)–(8), отношения энергий i -тых парциальных пучков, отраженных от одного и того же i -того элемента поверхности ΔS_i с коэффициентом отражения K_i определены в виде:

$$B_{1i}/B_{0i} = (\tau_p - \tau_i)/\tau_p, \quad (9)$$

$$B_{2i}/B_{0i} = \tau_i/\tau_p. \quad (10)$$

Искомые параметры τ_i , ξ_i определяем из (9) – «алгоритм 1» или (10) – «алгоритм 2»:

$$\tau_i = \tau_p [1 - (B_{1i}/B_{0i})],$$

$$\xi_i = 0,5C\tau_i = 0,5C\tau_p [1 - (B_{1i}/B_{0i})]. \quad (11)$$

$$\tau_i = \tau_p (B_{2i}/B_{0i}),$$

$$\xi_i = 0,5C\tau_i = 0,5C\tau_p (B_{2i}/B_{0i}). \quad (12)$$

С учетом уравнений (11), (12) рельефометрическая сигнатура поверхности объекта $\xi_i(S)$ по алгоритмам 1 и 2 определяется уравнениями (13), (14) соответственно:

$$\xi(S) = 0,5C\tau_p [1 - (B_1(S)/B_0(S))], \quad (13)$$

$$\xi(S) = 0,5C\tau_p [B_2(S)/B_0(S)]. \quad (14)$$

Коэффициент повышения эффективности использования энергии лазерного излучения n_R в предлагаемом методе определяется отношением уравнений (1) к (2)

$$n_R = \tau_{p,TOF}/\tau_p = R_{max}/\xi_{max}. \quad (15)$$

Из данного уравнения следует, что при равной энергии зондирующих импульсов $E_{TOF} = P_{0,TOF}\tau_{p,TOF} = E_p = P_{0,p}\tau_p$ импульсная мощность лазерных импульсов $P_{0,p}$ по предлагаемой методологии в n_R раз больше мощности лазерных им-

пульсов $P_{0,TOF}$, чем по ToF-технологии, т. е. $P_{0,p} = n_R P_{0,TOF} = (R_{max}/\xi_{max}) P_{0,TOF}$, так как длительность зондирующего импульса τ_p (2) с увеличением расстояния R в n_R раз меньше длительности зондирующего импульса $\tau_{p,TOF}$ (1). Учитывая квадратичную зависимость дальности действия лидара R_{max} от мощности зондирующих импульсов для протяженных объектов с диффузным отражением, коэффициент увеличения дальности K_R по сравнению с TOF – технологией пропорционален $\sqrt{n_R}$, т. е.

$$K_R = \sqrt{n_R} = \sqrt{R_{max}/\xi_{max}}. \quad (16)$$

Для точечных объектов коэффициент K_R пропорционален $\sqrt[4]{n_R}$ т. е.

$$K_R = \sqrt[4]{n_R} = \sqrt[4]{R_{max}/\xi_{max}}. \quad (17)$$

Так, например, для класса протяженных объектов с максимальной глубиной рельефа поверхности до $\xi_{max} = 3$ м (например, бронетехника), что соответствует наиболее крупным объектам в задачах обнаружения и распознавания малоразмерных объектов, и расположенных даже на сравнительно небольшом расстоянии от лидара, например $R_{max} = 300$ м, $K_R = \sqrt{300/3} = 10$, т. е. дальность действия лидара по нашей технологии при прочих равных условиях составит $R'_{max} = K_R R_{max} = 3$ км.

Согласно уравнений (16), (17), чтобы обеспечить такую дальность R'_{max} в ToF-лидаре мощность его излучения для протяженных объектов должна быть увеличена в $K_R^2 = n_R = 100$ раз, так как длительность зондирующего импульса $\tau_{p,TOF}$ составляет $\tau_{p,TOF} = 100\tau_p$; соответственно для точечных объектов мощность излучения должна быть увеличена в $K_R^4 = 10000$ раз.

Литература

1. Analysis of ways to improve the efficiency of ground-based optoelectronic observation complexes [In Russian Federation] / V. N. Baloev [et al.] // Optl J. – 2012. – V. 9 (3). – P. 22–32.
2. Ivanov, V. I. Investigation of the effect of noise parameters of 3D lidar on the error in estimating relief signatures of distant objects from 2D field intensity distributions of reflected radiation / V. I. Ivanov, N. I. Ivanov // Quantum Electronics. – 2020. – V. 50 (11). – P. 1068–1073.
3. Ivanov, V. I. Methodological aspects of creating a 3d lidar for obtaining relief-metric signatures of small-sized objects based on 2d distributions of the intensity of reflected radiations / V. I. Ivanov // Journal of Applied Spectroscopy. – 2024. – V. 91, № 1. – P. 110–118.
4. Ivanov, V. I. Methodology and algorithms for obtaining long-range 3D portraits of objects based on 2D intensity distributions of truncated realizations of reflected laser radiation / V. I. Ivanov // Computer Optics. – 2024. – V. 48, № 3. – P. 386–396.
5. Time of Flight Cameras: Principles, Methods, and Applications / M. Hansard [et al.]. – Springer, 2012.

УДК 535.243.2

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК В ЗАДАЧАХ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Казakov В. И., Китаев В. В.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП)
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Рассматривается возможность многокритериального контроля технологических процессов, сопровождающихся оптическими излучениями, посредством формирования векторов выхода на базе спектроскопических измерений дифракционным спектральным прибором. Предложена оптимизационная модель для нахождения наиболее подходящих параметров дифракционной решетки с целью ее эффективного применения в спектроскопических системах контроля. Представлены результаты моделирования дифракционной решетки с возможностью анализа спектров сразу в нескольких дифракционных порядках.

Ключевые слова: контроль, спектроскопические измерения, оптимизация, дифракционная решетка.

POSSIBILITIES OF APPLICATION OF DIFFRACTION GRATINGS IN PROBLEMS OF MULTICRITERIAL CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

Kazakov V., Kitaev V.

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The possibility of multi-criterial automatic control of technological process, accompanied by optical radiation, by means of formation of output vectors on the basis of spectroscopic measurements by a diffraction spectral device is considered. An optimization model is proposed for finding the most suitable parameters of a diffraction grating for the purpose of its effective application in spectroscopic control systems. The results of modeling a diffraction grating with the possibility of analyzing spectra in several diffraction orders at once are presented.

Key words: control, spectroscopic measurements, optimization, diffraction grating.

Адрес для переписки: Казakov В.И., ул. Большая Морская, 67, г. Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, e-mail: kvi@guap.ru

Введение. Возрастающая с каждым годом тенденция к интеграции все большего количества датчиков в единую контролируемую систему, например, интернета вещей, диктует современные тренды развития таких систем [1]. К числу таких трендов относятся миниатюризация, снижение энергопотребления и слияния датчиков. Этим трем трендам соответствует предлагаемая в работе замена множества классических датчиков – одним спектроскопическим, где измерительным прибором является дифракционный спектрометр.

Особенностью работы дифракционного спектрометра является многопорядковость формируемого спектра. На практике используется только один дифракционный порядок ввиду низкой интенсивности дифрагированного света в высшие порядки. В работе [2] показано, что задача перераспределения света в более высокие порядки может быть решена путем оптимизации функции пропускания дифракционной решетки. Это открывает возможности использования более высоких порядков для анализа спектра при выполнении процедуры контроля, например технологических процессов.

Многоальтернативная система контроля на базе спектрального прибора. Функциональная схема многоальтернативной системы автоматического управления с использованием дифракционного спектрального прибора представлена на рисунке 1.

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: x_k – входные переменные; ИУ – исполни-

тельные устройства; f_k – возмущающие воздействия. Вектор выхода $\{y_j\}$ формируется по результатам спектроскопических измерений, а система измерительных устройств (датчиков) заменяется одним измерительным устройством: оптическим дифракционным спектральным прибором.

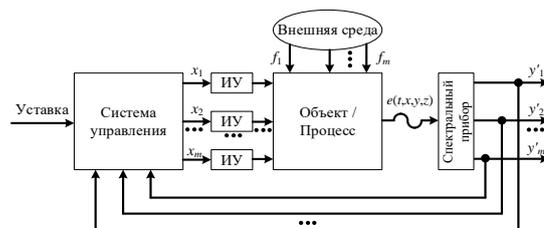


Рисунок 1 – Функциональная схема многоальтернативной системы автоматического управления

Оптимизация функции пропускания дифракционной решетки. Применение дифракционных решеток с оптимизированной функцией пропускания в многоальтернативных системах контроля имеет чрезвычайно большие перспективы. Например, одновременное измерение спектра оптического излучения в нескольких порядках может быть использовано для целей многопараметрического контроля процессов горения [3]. Низшие дифракционные порядки могут быть задействованы для измерения температуры процесса горения, в то время как использование выс-

ших дифракционных порядков может быть использовано для анализа спектрального состава и определения химических элементов, сопровождающих процесс горения.

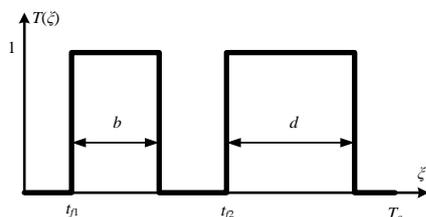
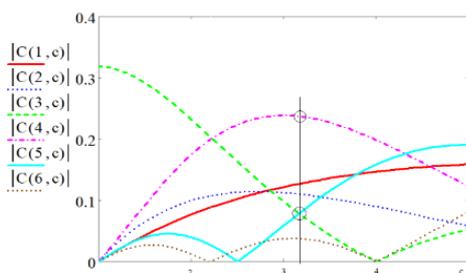
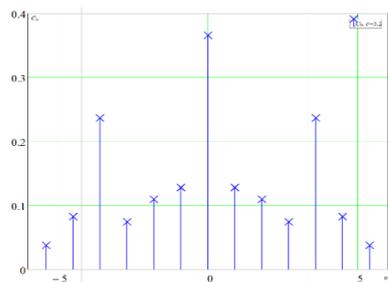


Рисунок 2 – Оптимизационные параметры функции пропускания решетки



а



б

Рисунок 3 – Результат компьютерного моделирования

Амплитудная дифракционная решетка, работающая в проходящем свете, рассмотрена как оптический транспарант с функцией пропускания $T(\xi)$ (рисунок 2), которая осуществляет ввод анализируемого оптического излучения в оптический когерентный Фурье-процессор, включающий два слоя свободного пространства и расположенную между ними линзу с фокусным расстоянием F . В задней фокальной плоскости линзы формируется оптический сигнал, отображающий мгновенный комплексный спектр анализируемого излучения, который подвергается квадратичному детектированию линейкой фотоприемных устройств. Показано, что коэффициенты разложения C_n в ряд Фурье функции пропускания дифракционной решетки $T(\xi)$

определяют интенсивность дифрагированного света в n -ый порядок.

На основе радиооптической модели [2] работы дифракционного спектрального прибора предложена модель, позволяющая находить оптимальные параметры штрихов решетки для эффективной дифракции в соответствующие дифракционные порядки. Алгоритм поиска оптимального решения для соответствующего дифракционного порядка сводится к перебору возможных значений параметров и нахождению максимального значения коэффициента C_n для интересующего дифракционного порядка.

Реализована программа, отражающая описанный выше алгоритм. Результат расчета параметров штрихов дифракционной решетки согласно предложенной модели представлен на рисунке 3. Рисунок 3, а соответствует изменению коэффициентов разложения функции пропускания решетки в процессе оптимизации; рисунку 3, б – результат расчета относительной интенсивности дифракции в оптимизированной решетке.

Таким образом, предложенная модель дает возможность увеличения интенсивности дифрагированного света в высшие порядки при дифракции на амплитудной пропускающей решетке. Показано, что путем изменения топологии дифракционной решетки возможно перераспределение света между дифракционными порядками, и эффективно использовать в спектроскопических системах контроля.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Литература

1. Подвальный, С. Л. Интеллектуальные системы многоальтернативного управления: принципы построения и пути реализации / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев // Всероссийское совещание по проблемам управления. – М.: ВСПУ, 16-19 июля 2014. – С. 996–1007.
2. Казаков, В. И. Измерение оптических спектров решеточным спектральным прибором в высших дифракционных порядках / В. И. Казаков, О. Д. Москалец // Датчики и системы. – 2018. – № 12 (231). – С. 22–27.
3. Ваганов, М. А. Многоканальный оптический спектрометр бесконтактного анализа для контроля процессов горения / М. А. Ваганов // Вопросы радиоэлектроники. – 2017. – № 10. – С. 39–43.

УДК 621.373.826

ЛАЗЕРНЫЙ СЕНСОР ДЫМА И ТЕПЛООВОГО КОНВЕКЦИОННОГО ПОТОКА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Казakov В. И., Рывкина Я. А., Параскун А. С.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП)
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Представлена схема и техническая реализация лазерного сенсора комбинированного принципа с возможностью обнаружения дыма и теплового конвекционного потока. Выполнены экспериментальные исследования по регистрации появления дыма и теплового конвекционного потока и выполнена компьютерная обработка полученных результатов. Приведен анализ возможностей внедрения нейронных сетей в сферу пожарной безопасности, в частности, в разработанный лазерный сенсор. Выполнена оценка эффективности применения нейронных сетей в этой задаче.

Ключевые слова: лазерный сенсор, тепловой поток, дым, нейронная сеть, обработка сигналов.

LASER SMOKE AND HEAT CONVECTION FLOW SENSOR USING NEURAL NETWORKS

Kazakov V., Ryvkina Y., Paraskun A.

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The scheme and technical implementation of the laser sensor of the combined principle with the ability to detect smoke and heat convection flow are presented. Experimental studies on the registration of the appearance of smoke and heat convection flow are carried out and computer processing of the obtained results is performed. An analysis of the possibilities of introducing neural networks into the field of fire safety, in particular, into the developed laser sensor, is given. An assessment of the effectiveness of using neural networks in this task is performed.

Key words: laser sensor, heat flow, smoke, neural network, signal processing.

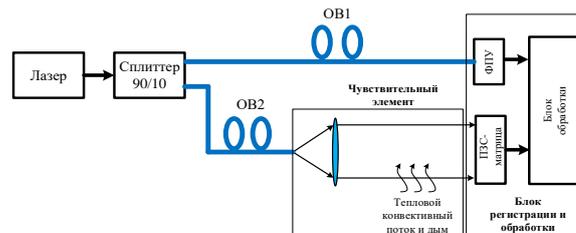
Адрес для переписки: Казakov В. И., ул. Большая Морская, 67, г. Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, e-mail: kvi@guap.ru

Введение. Применение лазерно-оптических технологий в задаче обнаружения теплового конвекционного потока является одним из перспективных направлений научных исследований, что подтверждается работами [1, 2]. Возгорание является экзотермической реакцией с выделением тепла, что приводит к случайным изменениям показателя преломления воздуха (тепловой конвекционный поток). Представленные в работах [3] результаты по исследованию влияния турбулентности атмосферы, наличия микрочастиц в воздухе на характеристики лазерных пучков, распространяющиеся в такой среде, позволяют утверждать, что по динамике изменения профиля лазерного пучка можно получить также информацию о наличии теплового конвекционного потока.

Схема лазерного сенсора. Структурная схема комбинированной системы обнаружения появления возгорания, основанная на регистрации и последующей обработке пространственных характеристик лазерного пучка, взаимодействовавшего с тепловым конвективным потоком и дымом представлена на рисунке 1 [4].

Система работает следующим образом. Излучение от лазера разделяется на 2 канала на сплиттере (90/10), причем большая часть мощности идет в основной канал по оптоволокну (ОВ2). Опорный канал (ОВ1) требуется для контроля параметров лазерного источника. На выходе из ОВ2 формируется лазерный пучок большого диаметра

(несколько сантиметров) для более эффективного взаимодействия с тепловым конвективным потоком. Далее лазерный пучок распространяется в контролируемом пространстве и попадает на ПЗС-матрицу блока регистрации и обработки сигналов. После детектирования оптических сигналов фотоприемным устройством и ПЗС-матрицей электрические сигналы подаются в блок обработки.



ОВ – оптоволокну; ФПУ – фотоприемное устройство

Рисунок 1 – Схема лазерного сенсора

Структурная схема блока обработки представлена на рисунке 2.

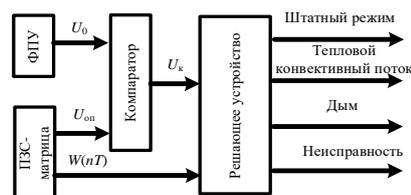


Рисунок 2 – Структурная схема блока обработки

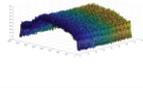
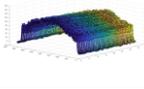
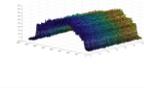
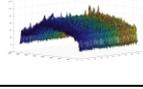
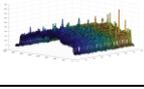
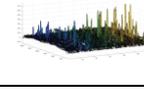
Принципы комбинированного обнаружения возгорания реализовано в блоке обработки сигналов. Остановимся подробнее на логике его работы. Этот блок регистрирует пространственное распределение пучка попиксельно и передает информацию о профиле пучка в блок обработки в цифровом виде в форме отсчетных значений интенсивности. В блоке обработки происходит компьютерная обработка полученных значений и формируется сигнал, отражающий динамику взаимодействия теплового конвективного потока и лазерного пучка. Одновременно происходит сопоставление уровней сигнала U_0 и $U_{оп}$ на компараторе. Полученный сигнал как разность этих двух уровней также поступает в блок обработки. На основании информации о полученных уровнях сигналов блок обработки выдает четыре вида оповещений: штатный режим работы, дым, тепловой конвективный поток, неисправность.

Экспериментальные исследования. Проведен ряд экспериментальных исследований, которые заключались в исследовании динамики профиля лазерного пучка при отсутствии и появлении теплового конвекционного потока. В течение 15 секунд велась регистрация выборок распределения профиля интенсивности пучка. Время накопления каждой выборки составляло 10 мкс.

В общей сложности было проведено 3 эксперимента, при этом изменялась длина чувствительной области, которая составила 0,5, 1 и 3,5 м соответственно.

Для наглядного представления флуктуаций лазерного пучка на таблице 1 приведены 3-D графики, отражающие динамику изменения распределения профиля интенсивности пучка при отсутствии и появлении теплового конвективного потока.

Таблица 1 – Динамика профиля лазерного пучка

	l = 0,5 м	l = 1 м	l = 3,5 м
Без ТКП			
С ТКП			

Для обработки был использован корреляционный метод обработки сигналов, заключающийся в расчете взаимно-корреляционной функции двух соседних выборок. Кроме того, авторами был использован второй метод обработки полученных результатов, который заключается в расчете интегрально-разностной функции, отражающей попиксельную разность зарегистрированных распределений интенсивностей профилей пучка.

На рисунке 3 приведен результат сопоставления эффективности использованных методов обработки.



Рисунок 3 – Оценка эффективности методов обработки

При оценке эффективности методов обработки предпочтительнее оказывается интегрально-разностный метод.

Несмотря на положительные результаты эксперимента, остается проблема вероятности ложных срабатываний из-за естественных тепловых потоков. Для ее решения предложено использование более сложных методов обработки, такие как нейронные сети. Нейросети уже показали свою эффективность в пироэлектрических пожарных датчиках. Основными этапами при такой постановке задачи являются выбор оптимальной нейросети и ее обучение.

Для оценки эффективности нейросети в задаче раннего обнаружения возгораний лазерно-оптическими методами использовался ряд параметров, таких как точность, прогнозируемость, устойчивость и вычислительная эффективность. Установлено, что для комплексной оценки лучше использовать несколько метрик, чтобы получить полное представление о том, как сеть справляется с задачей и насколько она пригодна для реальных применений.

Литература

1. Kazakov, V. I. Computer Processing of Laser Beam Profile Dynamics Changing During Interaction with a Thermal Convective Flow / V. I. Kazakov // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2023. – V. 597. – P. 972–979.
2. Beam displacement as a function of temperature and turbulence length scale at two different laser radiation wavelengths / W. M. Isterling [et.al.] // Appl. Opt. – V. 51. – 2012. – P. 55–63.
3. Деформация и блуждание вихревых пучков в искусственной конвективной турбулентности / А. В. Фалиц [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 2023. – Т. 36, № 8 (415). – С. 619–630.
4. Патент РФ 2805772. Волоконно-оптический датчик дыма и теплового конвекционного потока / В. И. Казаков, С. Н. Мосенцов, А. С. Параскун. – Оpubл. 24.10.2023.

УДК 681.7.01:535.313

**РАСЧЕТ И ИСПРАВЛЕНИЕ АБЕРРАЦИЙ ЛАЗЕРНОЙ РАЗВЕРТЫВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ
ДЛЯ СКАНИРУЮЩИХ ПРИБОРОВ С ПАРАБОЛОИДНЫМ ОТРАЖАТЕЛЕМ**

Канделинский С. Л., Ткаченко В. В., Утехин С. И.

*ГНУ «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Получена оценка aberrаций, ограничивающих разрешающую способность зеркальной системы формирования строчной развертки на основе параболического отражателя, и намечены варианты технических решений для их коррекции с целью приближения к теоретически предельному разрешению.

Ключевые слова: строчная развертка, параболический отражатель, дефлектор, оптические aberrации.

**CALCULATION AND CORRECTION OF ABERRATIONS IN LASER SCAN SYSTEM FOR
SCANNING DEVICES WITH A PARABOLOID REFLECTOR**

Kandelinsky S., Tkachenko V., Utekhin S.

*United Institute of Informatics Problems of NAS of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. An estimate of the aberrations limiting the resolution of byline scan mirror system based on a paraboloid reflector is obtained, and technical solutions for their correction are outlined in order to approach the theoretically maximum resolution.

Key words: byline scan, paraboloid reflector, deflector, optical aberrations.

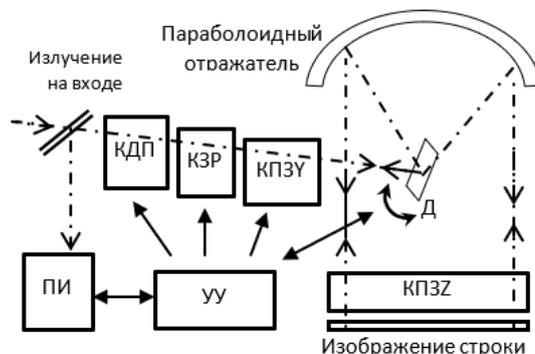
*Адрес для переписки: Ткаченко В. В., ул. Сурганова, 6, г. Минск 220012, Республика Беларусь
e-mail: tkach@newman.bas-net.by*

Контроль и измерение параметров полей при решении различных приборостроительных задач в ряде случаев реализуется с использованием сканирующего лазерного пучка. Высокое быстродействие и точность контроля (измерения) достигается при этом в оптико-механической развертывающей системе, например, с целью получения электронных и цифровых описаний этих изображений для последующей обработки, передачи и использования. В частном случае, для получения растрового изображения, волновой пучок излучения формируется в процессе сканирования одной фиксированной строки, заданной линией пересечения сканируемой поверхности с плоскостью развертки [1].

В развертывающей системе с зеркальными дефлекторами формирование сканирующего волнового пучка имеет различные варианты реализации в зависимости от положения и конструкции объектива, с помощью которого мгновенное поле зрения объектива (или прибора в целом) из плоскости сканирования переносится в апертуру фотоприемного устройства, образуя строки телевизионного раstra. В настоящей работе представлена оценка возможностей использования в системе формирования пучка с параболического зеркального отражателя, с помощью которого достигается при развертке пучка его телецентрический ход, что важно при построении прецизионных систем, и которому в ряде случаев может быть отдано предпочтение по сравнению с линзовым $F\theta$ -объективом [2].

Система строчной развертки. Общая схема формирования и управления сканирующим лазер-

ным пучком в развертывающей системе с параболическим зеркалом представлена на рисунке 1. В основе концептуального технического решения использован оптико-геометрический эффект системы коникоидов конус-параболоид, расчетно-математическая модель которого рассмотрена нами в [1].



УУ – устройство управления; ПИ – приемник излучения; Д – дефлектор; КДП – коллимирование и диафрагмирование пучка; КЗР – коррекция зоны резкости; КПЗУ – коррекция поля зрения вдоль строки; КПЗЗ – коррекция поля зрения поперек строки

Рисунок 1 – Система развертки луча для активного сканирования строки изображения

В результате анализа решений системы уравнений для конуса и парабоида получены условия, при которых обеспечивается телецентрический ход оси пучка в плоскости развертки, а именно: конус, поверхность которого представляет собой геометрическое место положений оси пучка, отраженного от зеркала дефлектора, своей вершиной должен

быть совмещен с фокусом параболоида, а своей образующей – с осью параболоида.

В практической реализации такой системы необходимо учитывать ее особенности, определяющие диапазон углов развертки, при которых сфокусированное пятно не превышает заданный размер и, соответственно, разрешающую способность в поле сканирования. Для безабберационных систем теоретический предел разрешающей способности определяется с учетом дифракционной расходимости γ волнового пучка по критерию Рэля:

$$N = Lnsin\gamma/0,61\lambda = Ld/1,22\lambda F \quad (1)$$

где N – число разрешимых элементов (пикселей); λ – длина волны излучения, $nsin\gamma$ – расходимость пучка в среде с показателем преломления n ; d – поперечный размер сечения пучка в апертуре фокусирующего элемента; L – длина строки, пропорциональная углу и плечу развертки пучка; F – рабочее расстояние элемента, фокусирующего (коллимирующего) волновой пучок. Наилучшее разрешение для системы с телецентрическим ходом пучка при отсутствии его виньетирования в крайних угловых положениях при развертке достигается, когда $d = L = D/2$, где D – апертура собирающего излучение объектива.

Численное моделирование сканирующего волнового пучка. Для оценки абберационных искажений и определения путей их коррекции проведено компьютерное моделирование хода лучей по законам геометрической оптики, представленных уравнениями в векторном виде:

– для виртуального конуса с внутренним углом 2β , образуемого при сканировании строки с помощью зеркального дефлектора

$$s \cdot v \pm \cos\beta = 0, \quad (2)$$

где v и s – орты оси вращения зеркала и осей падающих на него пучков от отражателя;

– для параболоида, совмещенного фокусом f с вершиной конуса на своей оси, заданной ортом i

$$((s \cdot i + 2f)i)^2 = s^2. \quad (3)$$

Моделированием с помощью инструментов MatCAD установлено, что зона наилучшей резкости в плоскости строчной развертки, секущей параболоид по линии параболы $y^2 = 4f(x - f)$, где x – значение координаты вдоль оси i , описывается уравнением

$$y^2 = 8fx, \quad (4)$$

а автоматическую коррекцию зоны резкости для совмещения ее с плоскостью сканируемого изображения можно выполнить с применением централированных оптических компонент, например, с помощью панкратического объектива. Однако этого не достаточно для получения разрешения, близкого к безабберационным системам (1), из-за поперечных

искажений в поле зрения зеркально-линзового объектива, которые по результатам моделирования иллюстрируются на рисунке 2.

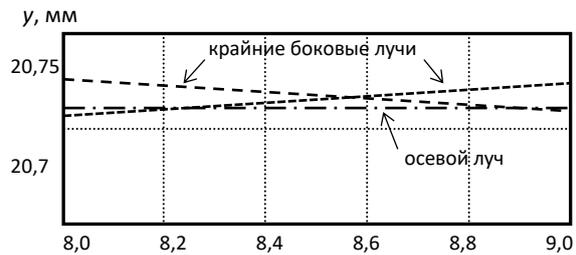


Рисунок 2 – Ход лучей в зоне резкости (расстояния x и y в мм относительно фокуса при $f = 25$ мм и $\beta = 45^\circ$)

В зеркально-линзовой системе с параболоидным отражателем абберации пучка не могут быть скомпенсированы достаточно эффективно с применением централированных компонент формирования пучка – в системе с угловой разверткой этого пучка само условие ее центрированности уже нарушается. Возможные варианты решения этой проблемы рассматриваются с введением в схему управления сканирующим лазерным пучком как показано на рисунке 1 двух контуров коррекции, разделенных по двум сечениям пучка вдоль и поперек строки и, соответственно, пространственно разнесенных оптических элементов для компенсации продольных и поперечных аббераций пучка.

Обсуждение результатов. Результаты проведенного анализа системы строчной развертки с параболоидным отражателем актуальны в проектировании оборудования для производства микроэлектроники нано- и микроуровня с использованием литографии в спектре экстремального ультрафиолета. Это значительный отход от традиционных литографических процессов, так как для работы требуется вакуум (вещество поглощает EUV-излучение, стекло и даже воздух). Вместо линз для фокусировки лучей света потребуются применение зеркал. Дополнительные варианты с введением канала управления формой и положением профилирующей диафрагмы для сканирующего пучка в зоне его коллимирования анализируются из условий оптимизации энергетических потерь в лазерном пучке и технико-экономических затрат в практической реализации приборов с заданными требованиями по назначению.

Литература

1. Канделинский, С. Л. Оптико-геометрический эффект пересечения согласованных коникоидов на примере строчной развертки луча / С. Л. Канделинский, В. В. Ткаченко // Оптический журнал. – 2023. – № 10. – С. 3–12.
2. Хацевич, Т. Н. Телецентрические объективы F-Theta для сканирующих систем / Т. Н. Хацевич, А. И. Боднарчук // Автометрия. – 2022. – Т 58, № 3. – С. 32–40.

УДК 621.375.826

ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛА КОРРУНДА С ТИТАНОМ ПРИ ДИОДНОЙ НАКАЧКЕ В СПЕКТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ОКОЛО 444 НМ

Кисель В. Э., Горбаченя К. Н., Гоман В. И.

НИЦ Оптических материалов и технологий, Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследованы генерационные характеристики кристаллов $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ при накачке излучением InGaN лазерного диода в спектральной области 444 нм. Измерены выходные характеристики излучателя: пороговые мощности накачки, эффективность генерации, зависимости выходной мощности лазера от мощности накачки, спектральные характеристики излучения.

Ключевые слова: кристалл сапфира с титаном, диодная накачка, непрерывный режим генерации, трехвалентные ионы титана.

LASER PERFORMANCE OF Ti:SAPPHIRE CRYSTAL UNDER DIODE PUMPING AT 444NM SPECTRAL REGION

Kisel V., Gorbachenya K., Goman V.

Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The laser performance of $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ crystal under pumping by InGaAs laser diode emitting at 444 nm was investigated. The laser output parameters were measured: laser threshold, slope efficiencies, dependencies of output power on pump power, spectral properties of laser radiation.

Key words: Ti:sapphire crystal, diode pumping, continuous wave mode of operation, trivalent titanium ions.

Адрес для переписки: Горбаченя К. Н., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: gorby@bntu.by

Кристаллы $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ представляют значительный интерес для использования в качестве активных сред лазерных систем ультракоротких импульсов и с перестройкой длины волны в широком спектральном диапазоне. Использование в качестве источников накачки для данных кристаллов дорогостоящих лазерных систем с удвоением частоты излучения значительно ограничивает круг возможных применений. Развитие и разработка лазерных диодов на основе нитридных структур InGaN, излучающих в сине-зеленой области спектра, совпадающей с полосами поглощения кристаллов $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$, значительно стимулировало интерес для разработки лазерных систем с диодной накачкой. Использование лазерных диодов в качестве источников накачки позволило также существенно увеличить эффективность лазера. В данной работе представлены результаты предварительных экспериментов по получению лазерной генерации на кристалле $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ при накачке лазерным диодом с длиной волны 444 нм.

Сечение поглощения и сечение усиления в кристаллах титан-сапфира зависят от поляризации излучения (рисунок 1).

Максимум сечений поглощения и стимулированного испускания наблюдается для π -поляризации излучения параллельной оптической оси с кристалла, поэтому для проведения лазерных экспериментов использовалась ориентация кристаллов вдоль оси а.

Для увеличения эффективности поглощения излучения накачки использовались наиболее кон-

центрированные кристаллы. В качестве активных элементов изготавливались плоскопараллельные пластинки апертурой $4 \times 4 \text{ мм}^2$ и толщиной 2,7 мм, что обеспечивало эффективное модовое перекрытие излучения накачки и моды резонатора в активном элементе и поглощение около 50 % излучения с длиной волны 444 нм. На полированные рабочие поверхности кристалла наносились антиотражающие покрытия на длину волны накачки и на область генерации 700–950 нм. Спектр поглощения кристаллов из которых изготавливались активные элементы представлен на рисунке 2.

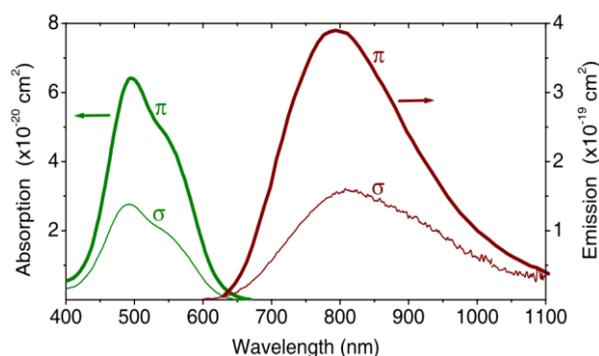


Рисунок 1 – Спектры поперечных сечений поглощения и стимулированного испускания кристаллов $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$

Лазерные эксперименты проводились в полусферической конфигурации резонатора состоящей из сферического высокоотражающего зеркала радиусом кривизны $R = 100 \text{ мм}$ и плоского

выходного зеркала с коэффициентом пропускания около 1 % в диапазоне длин волн 700–900 нм. Выходная характеристика излучателя представлена на рисунке 3.

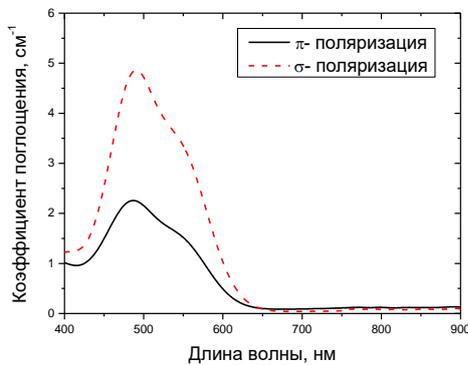


Рисунок 2 – Спектр поглощения концентрированного кристалла $Ti^{3+}:Al_2O_3$

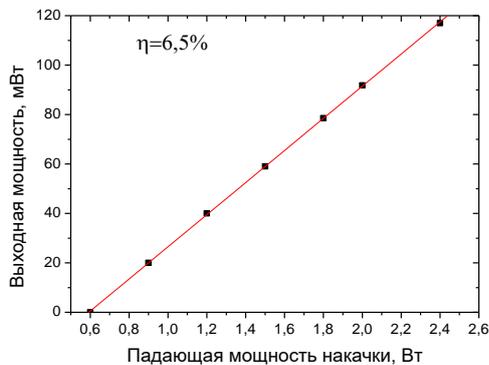


Рисунок 3 – Зависимость выходной мощности $Ti^{3+}:Al_2O_3$ лазера от падающей мощности накачки

Порог лазерной генерации наблюдался при падающей мощности накачки около 0,6 Вт, что связано с достаточно низким поглощением, а максимальная выходная мощность составила около 120 мВт с дифференциальной эффективностью генерации около 6,5 %. Центральная длина волны генерации составила около 720 нм со спектральной

полушириной около 20 нм. При долговременной работе лазерного излучателя в течение 15–20 минут после включения наблюдалось практически двухкратное падение выходной мощности, что связано с образованием центров окраски в кристалле $Al_2O_3:Ti^{3+}$, увеличивающих потери в активном элементе. Временная зависимость выходной мощности представлена на рисунке 4.

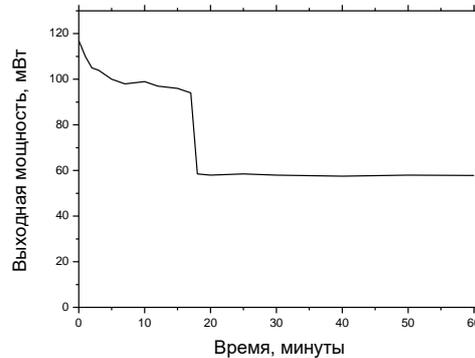


Рисунок 4 – Временная зависимость выходной мощности $Ti^{3+}:Al_2O_3$ лазера

Подобное поведение выходной мощности излучателя может быть обусловлено использованием в качестве источника накачки лазерного диода с длиной волны 444 нм, что приводит к возникновению переходов с переносом заряда ($Ti^{3+} \rightarrow Ti^{4+}$) и возникновению паразитных потерь в спектральной области генерации, связанных с поглощением из возбужденного состояния в спектральной области генерации. Пороговое значение энергии возбуждения для переходов с переносом заряда составляет около 4,17 эВ, и подобное поведение должно быть устранено при накачке источником излучения в меньшей энергией кванта или с длиной волны более 490 нм. Проведенные эксперименты, однако, свидетельствуют о достаточно высоком оптическом качестве выращенных кристаллов $Al_2O_3:Ti^{3+}$ и возможности создания на их основе лазерных систем с прямой диодной накачкой.

УДК 621.375.826

ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛОВ ДВОЙНЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ВОЛЬФРАМАТОВ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ТРЕХВАЛЕНТНЫХ ИОНОВ ИТТЕРБИЯ В НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Кисель В. Э.¹, Горбаченя К. Н.¹, Гурецкий С. А.², Кулешов Н. В.¹¹НИЦ Оптических материалов и технологий, Белорусский национальный технический университет²НПЦ НАН РБ по материаловедению

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследованы генерационные характеристики кристаллов $\text{Yb:KY}(\text{WO}_4)_2$ с высоким содержанием активатора в непрерывном лазере с продольной диодной накачкой в спектральной области около 980 нм.

Ключевые слова: кристаллы двойных вольфраматов, трехвалентные ионы иттербия, непрерывный режим генерации, диодная накачка.

LASER PROPERTIES OF DOUBLE RARE-EARTH TUNGSTATE CRYSTALS WITH HIGH YTTERBIUM CONCENTRATION IN CW MODE OF OPERATION

Kisel V.¹, Gorbachenya K.¹, Guretskii S.², Kuleshov N.¹¹Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University²Scientific and Practical Materials Research Center NAS Belarus

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The laser properties of heavily doped $\text{Yb:KY}(\text{WO}_4)_2$ crystals were investigated in continuous-wave (CW) laser under the diode pumping in the 980 nm spectral range.

Key words: double tungstate crystals, trivalent ytterbium ions, continuous-wave mode of operation, diode pumping.

Адрес для переписки: Горбаченя К. Н., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: gorby@bntu.by

Кристаллы калий-иттриевого ($\text{KY}(\text{WO}_4)_2$) вольфрамата принадлежат ряду двойных калий-редкоземельных вольфраматов. Кристаллы являются моноклинными с пространственной группой симметрии $C_{2h}^6 - C2/c$. Параметры элементарной кристаллической ячейки: $a = 8,05 \text{ \AA}$, $b = 10,33 \text{ \AA}$, $c = 7,54 \text{ \AA}$, $\beta = 94^\circ$. Ионы Yb^{3+} замещают в данных соединениях ионы Y^{3+} в позициях с локальной симметрией C_2 . Образцы монокристаллов были выращены путем кристаллизации из раствора в расплаве $\text{K}_2\text{WO}_4 + \text{WO}_3$ модифицированным методом Чохральского. В качестве шихты использовался окисел редкоземельного элемента. Были получены образцы высокого оптического качества с содержанием ионов Yb^{3+} от 0,2 ат.% до 100 ат.% по отношению к ионам Y^{3+} . С оптической точки зрения кристаллы являются двусными. Главные значения показателей преломления кристалла $\text{Yb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ на длине волны 1030 нм составляют: $n_g = 2,017$, $n_m = 1,982$, $n_p = 1,946$. Теплопроводность кристаллов составляет около $3,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}^{-1}$ вдоль оси оптической индикатрисы N_g , $3,0 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}^{-1}$ вдоль N_m и $2,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}^{-1}$ вдоль N_p .

Для исследования генерационных характеристик материала в непрерывном режиме генерации использовались образцы, прошедшие послеростовой отжиг. Кристаллы вырезались для работы вдоль оси оптической индикатрисы N_g для снижения влияния термооптических искажений на генерационные характеристики. Образцы активных элементов представляли собой плоскопараллель-

ные пластинки различной толщины. Для объективной оценки качества кристаллов с различным содержанием активных центров элементы изготавливались с постоянным значением произведения концентрации на их толщину, что важно при работе с квазитрехуровневыми средами. Соответственно, для кристаллов с содержанием ионов иттербия 100, 30, 20, 10, 5 и 2 ат.% толщины активных элементов составили 0,12, 0,4, 0,6, 1,2, 2,4 и 6 мм. Лазерные эксперименты проводились в резонаторе близком к полусферическому с глухим зеркалом радиусом кривизны 50 мм и плоским выходным зеркалом. В качестве источника накачки использовался одномодовый лазерный диод (для снижения влияния эффективности модового перекрытия в кристаллах различной толщины) мощностью 0,6 Вт со стабилизированной длиной волны 976 нм и спектральной полушириной линии $< 1 \text{ нм}$. Экспериментальная установка представлена на рисунке 1.

При использовании выходного зеркала с пропусканием 5 % для всех кристаллов наблюдалась генерация излучения с поляризацией параллельной оси оптической индикатрисы показателя преломления N_p с дифференциальной эффективностью около 60 % и центральной длиной волны 1038 нм, что хорошо соответствует пику стимулированного излучения в кристалле для данной поляризации. Обзор генерационных характеристик кристаллов с различным содержанием активатора представлен в таблице 1.

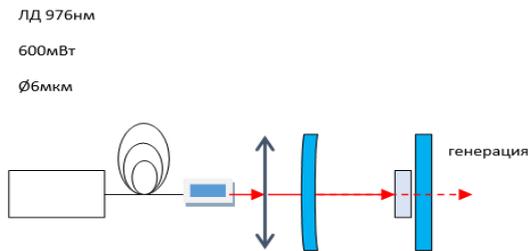


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки непрерывного лазера на основе кристалла $\text{Yb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$

Таблица 1 – Генерационные характеристики кристаллов $\text{Yb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ для выходного зеркала пропусканием 5%

Концентрация Yb^{3+} , ат%	$\eta_{\text{дифф}}$, %	Поляризация	λ , нм
2	64	$E//N_p$	1038
5	62		
10	60,4		
20	61		
30	60		
100	60		

При использовании зеркала с пропусканием 10 % наблюдалось переключение генерации в состояние поляризации параллельной оси N_m с длиной волны около 1030 нм, для которой наблюдается достижение порога генерации при меньшем

значении населенности верхнего лазерного уровня при данном уровне активных потерь в резонаторе. В данном случае дифференциальная эффективность генерации достигала 75 % и варьировалась от 72 до 75 % для кристаллов с различной концентрацией ионов иттербия. Обзор генерационных характеристик кристаллов с различным содержанием активатора представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Генерационные характеристики кристаллов $\text{Yb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ для выходного зеркала пропусканием 10%

Концентрация Yb^{3+} , ат%	$\eta_{\text{дифф}}$, %	Поляризация	λ , нм
2	75	$E//N_m$	1026
5	74		1026
10	75		1026
20	72		1029
30	73		1030
100	72		1031

Разница в дифференциальных эффективностях может быть обусловлена погрешностью измерений и позволяет сделать вывод о том, что качество элементов не зависит от содержания активных центров. Максимальная выходная мощность излучателей достигала 240 мВт, что соответствует оптической эффективности генерации около 40 %.

УДК 618

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА МЕХАНИЗМА ВЫВЕРКИ КОЛЛИМАТОРА МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ

Книга И. В.^{1,2}, Маляревич А. М.²

¹ОАО «Пеленг»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Описано применение одного из методов аддитивных технологий – селективного лазерного спекания – для создания опытного образца механизма выверки коллиматора.

Ключевые слова: аддитивные технологии, селективное лазерное спекание, механизм выверки коллиматора.

PRODUCTION OF A COLLIMATOR ALIGNMENT DEVICE'S PROTOTYPE BY SELECTIVE LASER SINTERING

Книга И.^{1,2}, Malyarevich A.²

¹OJSC "Peleng", Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Use one of the additive technologies methods – selective laser sintering – for prototyping a collimator alignment device is presented.

Key words: additive technologies, selective laser sintering, a collimator alignment device.

Адрес для переписки: Маляревич А. М., пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: malyar@bntu.by

Аддитивные технологии (АТ), которые в последние годы все более широко используются в отечественной промышленности, – это комплекс производственных процессов, когда изготовление изделия происходит путем добавления (от англ. add – добавлять) материала, в отличие от тради-

ционных технологий, где деталь создается методом удаления лишнего. В настоящее время производство с помощью АТ основано на процессе послойного синтеза изделий в монолитный объект заданной формы по электронной модели САПР. Аддитивные технологии называют по-разному:

Fast Free Form Fabrication, Solid Freeform Fabrication, в русскоязычной терминологии чаще всего используется – «быстрое прототипирование» (или просто – «прототипирование», от англ. Rapid Prototyping, RP). При этом деталь изготавливается с помощью 3D-принтера («3D printer», устройство, позволяющее «печатать» трехмерную деталь заданной программой формой). Основным материалом, из которого создаются детали, является пластик. Современные профессиональные 3D-принтеры способны использовать более сотни различных материалов для трехмерной печати объектов. Кроме того, уже появились устройства, которые умеют «работать» одновременно с несколькими материалами, в т. ч. металлами.

Преимущества аддитивного производства хорошо известны. Это:

- улучшенные свойства готовой продукции - например, детали, созданные на 3D-принтере из металла по своим механическим характеристикам (плотности, остаточному напряжению, др.) превосходят аналоги, полученные с помощью литья или механической обработки;

- большая экономия сырья. АТ используют практически то количество материала, которое нужно для производства изделия (при традиционных способах изготовления потери сырья могут составлять до 80–85 %);

- возможность изготовления изделий со сложной геометрией в т. ч. такие, которые невозможно получить другим способом (например, деталь внутри детали или сложные системы охлаждения на основе сетчатых конструкций, которые невозможно получить литьем или штамповкой);

- отсутствие необходимости разработки конструкторской документации на бумажном носителе;

- мобильность производства и ускорение обмена данными (программу изготовления изделия разработчик может в считанные минуты передать производителю на другой конец мира и начнется производство).

Из основных современных методов 3D-печати неметаллов (прототипирование методом наплавления (FDM), селективное лазерное спекание (SLS), лазерная стереолитография (SLA), ламинирование (LOM)) нами выбран метод селективного лазерного спекания [1]. В этом методе изделие образуется из порошкового продукта (керамики, пластика, металлопластика), который плавится в результате поглощения лазерного излучения (рисунок 1).

Метод SLS выбран нами для создания экспериментального образца механизма выверки коллиматора [2]. Печать этим методом позволяет изготавливать детали из полиамида при использовании лазера на углекислом газе, CO₂ мощностью около 100 Вт.

Преимуществами выбранного метода перед другими для наших целей заключаются в том, что материал, из которого изготавливается деталь,

позволяет в дальнейшем ее обработать (например, качественно отшлифовать поверхность, нарезать в отверстия резьбу требуемой точности). Кроме того, за одну операцию печати на одной подложке можно расположить сразу несколько деталей с габаритными размерами 150×70×50 мм (станок с ЧПУ не может изготавливать более одной детали в течение рабочего процесса). Это существенно повышает производительность труда, поскольку даже изготовление одной детали методом SLS несколько быстрее, чем традиционным механическим методом обработки.

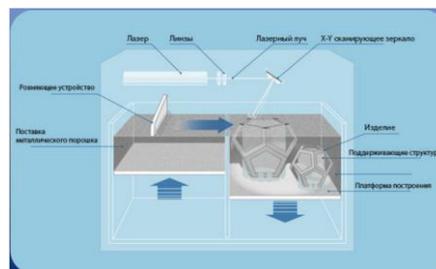


Рисунок 1 – Схема 3D-печати изделия методом селективного лазерного спекания

На рисунок 2 представлен пример детали, изготовленной указанным способом. Благодаря методу SLS-печати вес итогового изделия из полиамида 12 (PA 12) примерно в 2–2,5 раза меньше детали, выполненной из металла.

Прочностные характеристики изготовленной детали из полиамида уступают металлической. Мы предполагаем, что в дальнейшем за счет армирования можно достигать требуемых показателей.

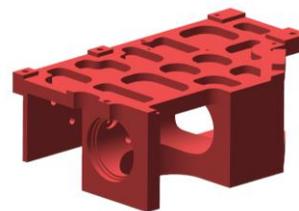


Рисунок 2 – Изготовленный опытный образец кронштейна выверки коллиматора

Таким образом, представлены результаты использования метода селективного лазерного спекания для изготовления опытного образца ответственной детали – кронштейна выверки коллиматора. Дальнейшие работы по повышению прочностных характеристик изделия позволят осуществить практическое применение метода в серийном производстве механизма выверки коллиматора.

Литература

1. Патент US 4863538 A. Method and apparatus for producing parts by selective sintering / Carl R. Deckard. – Publ. 05.09.1989.
2. Коллиматор. Физическая энциклопедия: в 5 т. / Гл. ред. А. М. Прохоров.–М.: Советская энциклопедия, 1990. – Т. 2. – 704 с.

УДК 681.7.023.72

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИНЗ МАЛОЙ ЖЕСТКОСТИ**Козерук А. С., Кузнецик В. О., Шевченко В., Якубович Т. С.***Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация: Изложена принципиальная кинематическая схема технологического оборудования для шлифования и полирования оптических деталей малой жесткости со сферическими поверхностями. Предложена прогрессивная технологическая оснастка для крепления линз.

Ключевые слова: тонкий центр, двусторонняя обработка, технологическая оснастка.

LOW-RIGIDITY LENS MANUFACTURING TECHNOLOGY**Kozeruk A., Kuznechik V., Shevchenko V., Yakubovich T.***Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Annotation: A diagram of a machine for simultaneous double-sided processing of lenses with a thin center is presented. Technological equipment for attaching lenses is proposed.

Keywords: thin center, double-sided processing, technological equipment.

*Адрес для переписки: Козерук А. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: akozeryk@gmail.com*

Технологический процесс изготовления линз складывается из выполняемых в определенной последовательности операций обработки исполнительных поверхностей деталей и зависит от типа производства и конструктивных особенностей линзы.

Технологический процесс включает основные операции, связанные с механообработкой, и вспомогательные, к которым относятся блокирование, разблокирование и промывка.

Для повышения производительности обработки детали обрабатываются блоками. Положение деталей на блоке в мелкосерийном производстве фиксируют приклеиванием к наклеичному приспособлению толстым слоем смолы, которая, застывая, деформирует поверхность линзы с тонким центром. Причиной этого явления является неодинаковые температурные изменения наклеичной смолы, оптического стекла и металла наклеичного приспособления. Деформация преломляющей поверхности линзы, вследствие блокировки, приводит к появлению зональных ошибок. Для уменьшения деформации поверхности детали при односторонней обработке используют специальные приемы.

Альтернативой односторонней классической технологии изготовления линз с тонким центром является одновременная двусторонняя обработка линзы с фиксацией ее в процессе обработки за боковую поверхность [1].

Кинематическая схема технического решения для операций окончательного шлифования и полирования линз малой жесткости изложена на рисунке 1. При реализации этой схемы первоначально закрепленную в оправке 6 деталь 7 помещают между «грибом» 8 и «чашкой» 10 и

включают электродвигатели 4, 9, 11, которые через вал 3, зубчатые колеса 2 и 5, оправку 6 приводят во вращение линзу 7, а через вал 28 и 29 – инструменты.

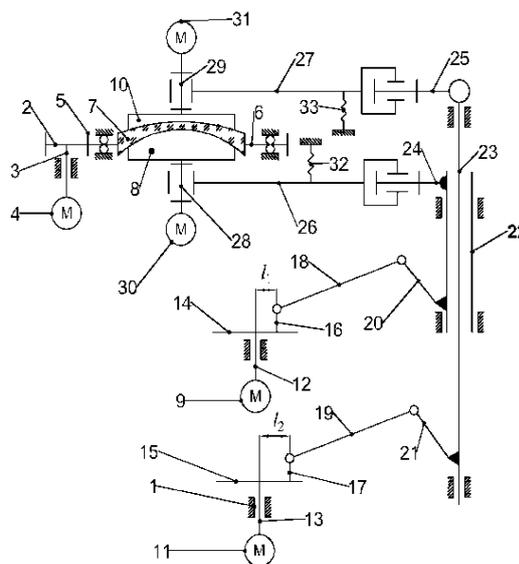


Рисунок 1 – Кинематическая схема технического решения для формообразования высокоточных линз малой жесткости

Электродвигатели 9 и 11 также через валы 12 и 13, диски 14 и 15, стержни 16 и 17, шатуны 18 и 19, штанги 20 и 21, валы штанги 22 и 23, штанги 24 и 25, подвижную часть штанг 26 и 27, валы 28 и 29 вызывают колебательное перемещение инструментов 8 и 10 по обрабатываемым поверхностям линзы 7.

Изменяя наладочные параметры станка (например, скорость вращения линзы; амплитуду

возвратно-вращательных перемещений инструментов; количество двойных ходов в минуту инструмента; скорости вращения инструментов; рабочее усилие с помощью пружин 32 и 33) можно управлять величиной съема припуска с детали в процессе ее обработки [2].

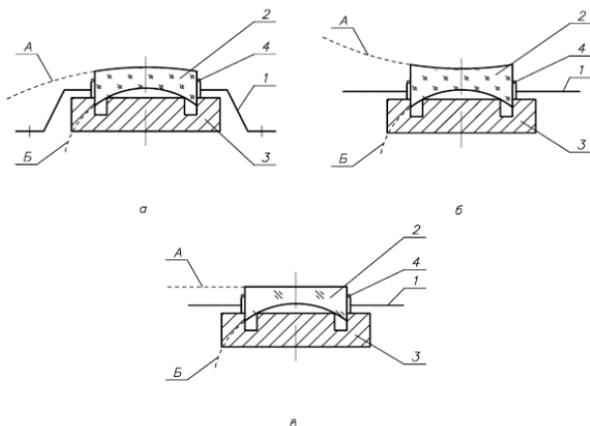


Рисунок 2 – Приспособления для точечного крепления линз за нерабочую поверхность

Одним из достоинств рассматриваемой схемы обработки является то, что она позволяет исключить крепление линз наклейной смолой последовательно за ее исполнительные поверхности. В данном случае крепление заготовки линзы происходит за ее боковую нерабочую поверхность с помощью специальных оправок (рисунок 2) и фотополимерной смолы, которую в виде капель вводят в зазор между линзой и оправкой и которая в процессе полимеризации не вызывает деформаций в стекле, или механическим способом (для деталей увеличенного размера) с применением устройства, показанного на рисунок 3. При использова-

нии последнего в зажимное кольцо 7 с тонкой резиновой прокладкой 11 устанавливают деталь 12, затем их помещают на основании 1 между лепестками 2 и поворачивают зажимное кольцо 5, в результате чего оправа пазом 6 давит на рычаги 4, которые, вращаясь вокруг оси 3, входят в паз 8 и фиксирует деталь в приспособлении. После этого винтом 10 прижимают зажим 9 к оправе и основанию, обеспечивая тем самым неподвижное крепление заготовки в устройстве.

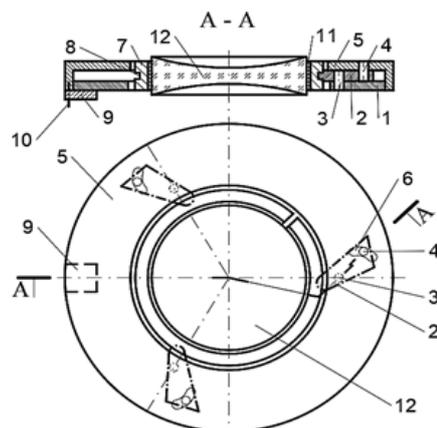


Рисунок 3 – Приспособление для механического крепления

Литература

1. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. – Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1997. – 176 с.
2. 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 л.

УДК 621.384.3:621.391

АКТИВНО-ИМПУЛЬСНАЯ СИСТЕМА ВИДЕНИЯ ДЛЯ НОЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТОМ В УСЛОВИЯХ МЕТЕОПОМЕХ

Кунцевич Б. Ф.

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Численно исследована возможность использования активно-импульсных систем видения для ночного управления транспортом, в том числе в условиях метеопомех. Для выяснения условий реализации квазиравномерной подсветки рабочая дистанция методом подбора разбивается на необходимое число зон видимости, сигналы от которых автоматически последовательно регистрируются за время формирования видеокadra, позволяя в конечном итоге вычислить «суммарный» сигнал для всей рабочей дистанции. На основе построения суммарного пространственно-энергетического профиля (ПЭП) всей рабочей дистанции продемонстрирован возможный вариант выделения подходящего числа зон видимости и распределения мощности подсветки по зонам для режима движения с ближним светом.

Ключевые слова: активно-импульсная система видения, движение с ближним светом, пространственно-энергетический профиль рабочей дистанции.

ACTIVE-PULSE VISION SYSTEM FOR NIGHT VEHICLE CONTROL IN DIFFICULT WEATHER CONDITIONS

Kuntsevich B.

SSPA “Optics, Optoelectronics and Laser Technology”
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The possibility of using active-pulse vision systems for night transport control, including in conditions of meteorological interference, is numerically investigated. To clarify the conditions for implementing quasi-uniform illumination, the working distance is divided by the selection method into the required number of visibility zones, the signals from which are automatically sequentially recorded during the formation of a video frame, allowing ultimately to calculate the “total” signal for the entire working distance. Based on the construction of the total spatial-energy profile (SEP) of the entire working distance, a possible option for selecting a suitable number of visibility zones and distributing the backlight power by zones for driving modes with low beam is demonstrated.

Key words: active-impulse vision system, movement with low beam, spatial-energy profile of the working distance.

Адрес для переписки: Кунцевич Б. Ф., пр. Независимости, 68-1, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: boris_kuntsevich@mail.ru

В настоящее время активно-импульсные системы видения (АИСВ) широко используются для решения различных научных и практических задач [1]. Кратко их принцип работы можно сформулировать следующим образом. Наблюдаемая область пространства освещается периодически повторяющимися лазерными импульсами, длительность которых $\Delta t_{\text{лаз}}$ значительно меньше времени $\Delta t_{\text{об}}$ распространения света до зоны наблюдения и обратно. В приемном блоке в качестве быстродействующего затвора и усилителя принимаемого отраженного светового излучения обычно используется электронно-оптический преобразователь (ЭОП), который синхронно включается с лазерными импульсами на время $\Delta t_{\text{фп}}$ (строб-импульс фотоприемника), сравнимое с $\Delta t_{\text{лаз}}$. Регулировка времени задержки $\Delta t_{\text{зад}}$ между началами импульсов подсветки и стробирования изменяет расстояние до зоны наблюдения. АИСВ позволяют наблюдать объекты в сравнительно узком слое пространства, называемом зоной видимости (ЗВ).

В последнее время исследуются возможности использования АИСВ для обеспечения безопас-

ного ночного управления транспортом в условиях метеопомех (например, [2]) В данной работе впервые вычисляется пространственно-энергетический профиль (ПЭП) рабочей дистанции (до 50 м; режим движения с ближним светом (ДБ)), представляющий собой сумму ПЭП отдельных зон видимости (ЗВ). За основу взят метод автосканирования рабочей дистанции. В этом случае рабочая дистанция «разбивается» на совокупность отдельных ЗВ, которые за время формирования одного видеокadra (1/25 секунды) последовательно регистрируются.

Величина регистрируемого сигнала $E(S)$ (т. е. ПЭП) определялась с помощью выражения [3]:

$$E = E_0 S^2 \exp(-2\alpha S) fL(t - 2S/c) G(t - \Delta t_{\text{зад}}) dt \quad (1)$$

где S – расстояние; E_0 – величина, не зависящая от S ; α – показатель ослабления лазерного излучения в атмосфере; t – время; L и G – функции, описывающие временные зависимости интенсивности излучения лазерной подсветки и чувствительности приемного блока (коэффициента усиления яркости ЭОП).

Результаты расчетов и их обсуждение. Предполагается, что при ДБС самый близкий предмет находится на расстоянии ~ 5 м. Для определенности выбирая $\Delta t_{\text{лаз}} = t_{206}/4$, получаем $\Delta t_{\text{лаз}} \approx 8$ нс. На длительность $\Delta t_{\text{фп}}$ никаких ограничений не накладывается. Для увеличения длины ЗВ выбрано $\Delta t_{\text{фп}} = 150$ нс.

При расчетах предполагалось, что подсветка осуществляется лазерным излучением с длиной волны 840 нм. Формы импульса лазерной подсветки и строб-импульса задавались прямоугольными. При расчетах варьировались амплитуда (максимальное значение) мощности импульсов подсветки $P_{\text{лаз}}$, число ЗВ и распределение $P_{\text{лаз}}$ по зонам. Предполагается, что коэффициент усиления яркости ЭОП равен: $G_m = 40000$ [1]. Значения остальных параметров: метеорологическая дальность видимости $S_{\text{мдв}} = 20$ км (если не оговорено другое).

На рисунке 1 приведен пример расчета возможной реализации квазиравномерного распределения энергии подсветки при «разбиении» рабочей дистанции на 23 ЗВ. На рисунке 1, а цифрами обозначены вычисленные ПЭП для каждой из зон видимости E_n . Для упрощения рисунка изображены ПЭП только для трех первых и последних ЗВ. На рисунке 1, б приведен результирующий ПЭП, который представляет собой просуммированный по всем ЗВ сигнал $E_{\text{сум}}$ для каждого значения расстояния S . Приведем параметры, которые подбирались при расчетах для каждой ЗВ: 1(2; 1; $3,9 \cdot 10^{-10}$), 2(4; 4; $3,1 \cdot 10^{-10}$), 3(6; 6; $2,2 \cdot 10^{-10}$), 4(8; 9; $1,8 \cdot 10^{-10}$), 5(10; 12; $1,5 \cdot 10^{-10}$), 6(12; 15; $1,3 \cdot 10^{-10}$), 7(14; 18; $1,2 \cdot 10^{-10}$), 8(16; 22; $1,1 \cdot 10^{-10}$), 9(18; 25; $1,0 \cdot 10^{-10}$), 10(20; 29; $9,2 \cdot 10^{-11}$), 11(22; 33; $8,8 \cdot 10^{-11}$), 12(24; 37; $8,3 \cdot 10^{-11}$), 13(26; 40; $7,7 \cdot 10^{-11}$), 14(28; 43; $7,1 \cdot 10^{-11}$), 15(30; 47; $6,7 \cdot 10^{-11}$), 16(32; 50; $6,2 \cdot 10^{-11}$), 17(34; 52; $5,8 \cdot 10^{-11}$), 18(36; 53; $5,2 \cdot 10^{-11}$), 19(38; 55; $4,9 \cdot 10^{-11}$), 20(40; 57; $4,6 \cdot 10^{-11}$), 21(42; 61; $4,5 \cdot 10^{-11}$), 22(44; 63; $4,2 \cdot 10^{-11}$), 23(46; 67; $4,1 \cdot 10^{-11}$). Здесь введены обозначения: число перед круглой скобкой обозначает номер зоны видимости n ; в круглых скобках: первое число – расстояние задержки $S_{\text{зад}} = c\Delta t_{\text{зад}2}$ (в м); второе число – коэффициент k , на который надо умножить амплитуду мощности подсветки для соответствующей зоны по сравнению с амплитудой мощности для первой зоны (для 1-й ЗВ $k = 1$ для метеорологической дальности видимости $S_{\text{мдв}} = 20$ км); третье число – выбранное максимальное значение энергии подсветки $E_{\text{макс}}$ (в Дж) для соответствующей ЗВ. Для простоты при увеличении номера зоны на единицу значение $S_{\text{зад}}$

увеличивается на 2 м. Коэффициенты k подбирались численным путем. Из рисунка 1, б следует, что на малых дистанциях глубина модуляции суммарного ПЭП $E_{\text{сум}}$ максимальна. Для уменьшения глубины модуляции в этом диапазоне использованный шаг приращения $S_{\text{зад}}$ в 2 м можно заменить на 1 м. Таким образом, рисунок 1, б свидетельствует о возможности реализации квазиравномерной яркости изображения в режиме ДБС путем регистрации за время одного кадра совокупности зон видимости (автосканирования) с указанными выше подобранными параметрами.

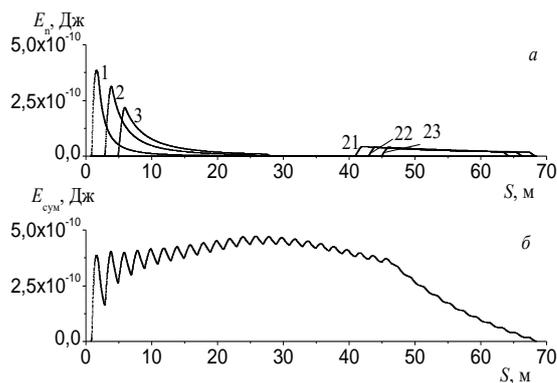


Рисунок 1 – Зависимости величин регистрируемых сигналов E_n для трех первых и последних зон видимости (а), а также результирующего сигнала $E_{\text{сум}}$ (б) от расстояния S

Дополнительные расчеты показали возможность реализации квазиравномерной подсветки рабочей дистанции при $S_{\text{мдв}} = 0,35$ км (обычный туман) и $S_{\text{мдв}} = 0,10$ км (густой туман). В последнем случае для реализации сравнительного большого максимального значения $k = 1638$ потребуются дополнительные технические решения (например, увеличение числа лазеров подсветки).

Литература

1. Волков, В. Г. Новые лазерные приборы наблюдения / В. Г. Волков, Б. А. Случак // Контенант. – 2016. – Т 15, № 3. – С. 62–70.
2. Случак, Б. А. Оптико-электронный прибор для ночного управления транспортом в условиях метеопомех / Б. А. Случак, В. О. Умнов // XXXIII Международная конференция «Лазеры в науке, технике, медицине»: сборник научных трудов. – Т. 33; под ред. В. А. Петрова. – М, 2023. – С. 91–96.
3. Кунцевич, Б. Ф. Особенности пространственно-энергетического профиля сигнала, регистрируемого актино-импульсными системами видения, при учете энергии шумового порога // Журн. прикл. спектр. – 2022. – Т. 89, № 2. – С. 869–877.

УДК 621.373.826

ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛАЗЕРА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА $\text{Yb:Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$
Лазарчук А. И., Кисель В. Э., Ясюкевич А. С., Гоман В. И.*НИЦ Оптических материалов и технологий, Белорусский национальный технический
Университет, Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе сообщается о работе непрерывного лазера на основе кристалла гадолиний-иттриевого оксиортосиликата, легированного ионами иттербия $\text{Yb:Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$ (Yb:GYSO). Максимальная выходная мощность составила 382 мВт на длине волны 1089 нм с дифференциальной эффективностью около 75 % для поляризации выходного излучения E//Np. Непрерывная перестройка длины волны генерации лазера более 100 нм продемонстрирована для трех поляризаций выходного излучения. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности кристаллов Yb:GYSO, для применения в качестве активных сред лазеров с диодной накачкой, работающих в области около 1 мкм.

Ключевые слова: кристаллы оксиортосиликата, иттербий, непрерывный лазер, перестроечные характеристики.

CHARACTERISTICS OF A CONTINUOUS-WAVE LASER ON $\text{Yb:Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$ CRYSTAL
Lazarchuk A., Kisel V., Yasukevich A., Goman V.*Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The paper reports on the operation of a continuous-wave laser based on a crystal of gadolinium-yttrium oxyorthosilicate doped with ytterbium ions $\text{Yb:Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$ (Yb:GYSO). The maximum output power was 382 mW at a wavelength of 1089 nm with a slope efficiency of about 75 % for the polarization of the output radiation E//Np. Continuous tuning of the laser generation wavelength by more than 100 nm was demonstrated for three polarizations of the output radiation. The obtained results indicate the promise of Yb:GYSO crystals for use as active media in diode-pumped lasers operating in the region of about 1 μm .

Key words: oxyorthosilicate crystals, ytterbium, continuous-wave laser, tunability curves.

*Адрес для переписки: Лазарчук А. И., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: lazartschuk1405@gmail.com*

Кристаллы с ионами Yb^{3+} характеризуются спектроскопическими свойствами, удовлетворяющими требованиям для получения эффективной лазерной генерации. Также простая схема уровней энергии приводит к отсутствию потерь на поглощение из возбужденного состояния, апконверсию, кросс-релаксацию и другие концентрационные эффекты. Однако Yb-лазеры работают по квазитрехуровневой схеме генерации, из-за чего порог генерации достигается при более высоких мощностях накачки по сравнению с Nd-лазерами. Это связано с тем, что конечный лазерный уровень в исходном состоянии является частично заселенным [1].

Кристаллы оксиортосиликатов легированные иттербием Yb^{3+} такие как $\text{Yb:Y}_2\text{SiO}_5$ (Yb:YSO), $\text{Yb:Lu}_2\text{SiO}_5$ (Yb:LSO), $\text{Yb:Sc}_2\text{SiO}_5$ (Yb:SSO), $\text{Yb:Gd}_2\text{SiO}_5$ (Yb:GSO) и их разрешенные соединения Yb:LYSO и Yb:GYSO отличаются относительно сильным штарковским расщеплением нижнего мультиплета $^2\text{F}_{7/2}$ [2]. Это приводит к уменьшению порога генерации, возможности генерации относительно длинноволнового излучения (> 1100 нм), а также получения широкой полосы усиления что важно для перестройки длины волны генерации и получения ультракоротких импульсов. Эти свойства делают кристаллы оксиортосиликатов интересными активными средами

для создания перестраиваемых и фемтосекундных лазеров, излучающих в спектральном диапазоне около 1 мкм.

В этой работе мы сообщаем о исследовании выходных характеристик непрерывного лазера на основе кристалла $\text{Yb:Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$ с поляризацией выходного излучения параллельного трем осям оптической индикатрисы.

Резонатор для работы лазера в непрерывном режиме построен по четырехзеркальной схеме (рисунок 1). Он состоит из двух сферических зеркал M1 и M2 ($R = 100$ мм), высокоотражающего зеркала HR и выходного зеркала OC. Для перестройки длины волны излучения генерации лазера, в резонатор вводилась призма (SF-10).

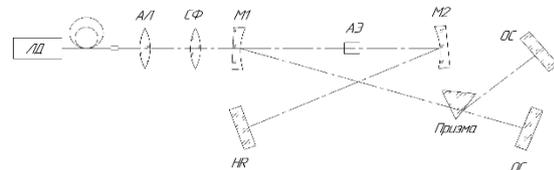


Рисунок 1 – Схема лазера на основе кристалла Yb:GYSO

Расчетный диаметр моды TEM₀₀ в кристалле составил около 35 мкм. В качестве источника накачки использовался одномодовый InGaAs лазерный диод с волоконным выходом, с максимальной выходной

мощность 600 мВт на длине волны 975,5 нм. Длина волны излучения лазерного диода стабилизирована брэгговской решеткой. Пятно излучения накачки диаметром 35 мкм было сформировано с помощью асферической линзы (АЛ) с фокусным расстоянием 18,4 мм и сферической линзы (СЛ) с фокусным расстоянием 100 мм.

В качестве активной среды использовались кристаллы $\text{Yb}^{3+}(4,58 \text{ ат.}\%):\text{Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$ толщиной 2 мм и апертурой 8×2 мм с просветляющим покрытием на длинах волн накачки и генерации. Для поддержания температуры кристаллов на уровне 21 °С они помещались в медный теплоотвод с использованием индиевой фольги для лучшего отвода тепла.

Сначала был исследован кристалл, вырезанный вдоль оси оптической индикатрисы N_r с возможностью генерации излучения с поляризациями параллельной осям оптической индикатрисы N_m и N_g . Зависимости выходной мощности лазера от поглощенной мощности при пропускании выходных зеркалах 1,5, 3,5, 5,7 % показаны на рисунке 2.

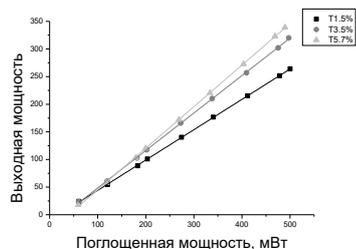


Рисунок 2 – Выходные характеристики лазера на основе кристалла $\text{Yb}:\text{GYSO}$ вырезанного вдоль оси оптической индикатрисы N_r

Максимальное значение выходной мощности 339 мВт получено для поляризации выходного излучения $E//N_g$ на длине волны 1088,5 нм и пропускании выходного зеркала 5,7 %. Дифференциальная эффективность достигала 75 %.

Для кристалла, вырезанного вдоль оси N_g и возможностью генерации выходного излучения с поляризацией $E//N_m$ и $E//N_r$ зависимости выходной мощности лазера от поглощенной мощности при тех же выходных зеркалах показаны на рисунке 3.

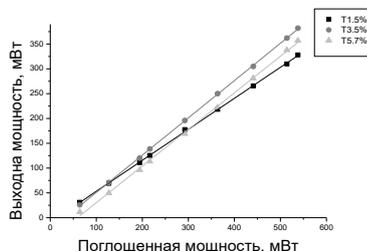


Рисунок 3 – Выходные характеристики лазера на основе кристалла $\text{Yb}:\text{GYSO}$ вырезанного вдоль оси оптической индикатрисы N_g

Максимальная мощность в этом случае была получена при пропускании выходного зеркала 3,5 % и составляла 382 мВт на длине волны 1089,2 нм с поляризацией выходного излучения $E//N_r$. Дифференциальная эффективность достигала 75 %.

Для измерения перестроечных характеристик лазера (рисунок 4) для трех поляризация выходного излучения при пропускании выходного зеркала 1,5 % в одно из плеч резонатора устанавливалась призма.

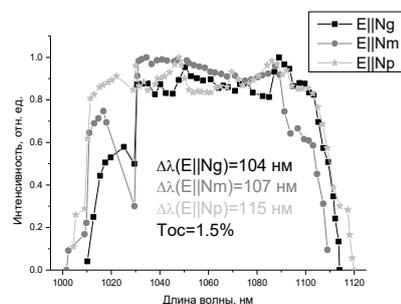


Рисунок 4 – Перестроечные характеристики непрерывного $\text{Yb}:\text{GYSO}$ лазера

Длина волны $\text{Yb}:\text{GYSO}$ лазера с поляризацией излучения $E//N_g$ может быть перестроена в диапазоне от 1010 до 1114 нм. Для излучения с поляризацией $E//N_r$ продемонстрирована перестройка от 1005 до 1120 нм, а для излучения с поляризацией $E//N_m$ диапазон перестройки составляет от 1002 до 1109 нм. Для трех поляризаций излучения диапазон перестройки более 100 нм.

На рисунке 5 приведен пространственный профиль лазерного пучка.

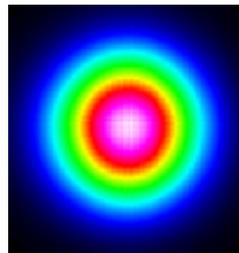


Рисунок 5 – Пространственный профиль пучка лазера

Полученные результаты демонстрируют перспективность использования кристалла $\text{Yb}:\text{GYSO}$ для создания эффективных непрерывных лазеров и лазерных систем генерации ультракоротких импульсов.

Литература

1. Krupke, W. Ytterbium Solid-State Lasers-The First Decade / W. Krupke // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2002. – V. 6, № 6. – P. 1287–1296.
2. Optical and laser properties of $\text{Yb}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ single crystals and discussion of the figure of merit relevant to compare ytterbium-doped laser materials / R. Gaume [et al.] // Optical Materials. – 2002. – V. 19, № 1. – P. 81–88.

УДК 621.3.038.825.2

НЕПРЕРЫВНЫЙ ЛАЗЕР НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА Pr:YLF

Лазарчук А. И., Шишко Т. А., Ясюкевич А. С., Горбаченя К. Н., Кисель В. Э., Кулешов Н. В.

НИЦ оптических материалов и технологий, Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе сообщается о результатах исследования генерационных характеристик кристаллов Pr:YLF в непрерывном режиме в видимой области спектра при накачке излучением 2ω -OPSL с длиной волны 479 нм. Максимальная выходная мощность лазера 2,5 Вт получена на длине волны генерации 640 нм при поглощенной мощности накачки 4,2 Вт. Дифференциальная эффективность лазерной генерации достигала 62 %. На длине волны генерации 607 нм максимальная выходная мощность составила 1,5 Вт при дифференциальной эффективности 40 %. На длине волны генерации 523 нм максимальная выходная мощность не превышала 0,4 Вт при поглощенной мощности накачки 2,75 Вт. При этом дифференциальная эффективность лазерной генерации на данной длине волны составила 21 %.

Ключевые слова: празеодим, иттрий-литиевый фторид, лазер, непрерывный режим работы.

CONTINUOUS-WAVE Pr:YLF LASER

Lasarchuk A., Shishko T., Yasukevich A., Gorbachenya K., Kisel V., Kuleshov N.

Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. We report results of investigation of the laser characteristics of Pr:YLF crystals in a continuous-wave mode in the visible region of the spectrum when pumped by 2ω -OPSL radiation with a wavelength of 479 nm. The maximum output power of 2.5 W was obtained at a wavelength of 640 nm at an absorbed pump power of 4.2 W. The slope efficiency reached 62 %. At a wavelength of 607 nm, the maximum output power was 1.5 W with a slope efficiency of 40 %. At a wavelength of 523 nm, the maximum output power did not exceed 0.4 W at an absorbed pump power of 2.75 W. In this case, the slope efficiency of laser generation at this wavelength was 21 %.

Key words: Praseodymium; yttrium-lithium fluoride; laser; continuous-wave regime of operation.

Адрес для переписки: Кулешов Н.В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: nkuleshov@bntu.by

В последние годы интерес исследователей привлекают лазеры, генерирующие в видимом спектральном диапазоне при непосредственной накачке источниками в видимой области спектра. Это стало возможным благодаря появлению коммерчески доступных InGaN/GaN лазерных диодов, а также оптически накачиваемых полупроводниковых лазеров, генерирующих на частоте второй гармоники (2ω -OPSL (англ) – optically pumped semiconductor laser). Неоспоримым преимуществом непосредственного получения генерации в видимом спектре является отсутствие нелинейных преобразований: удвоения основной частоты излучения, а также параметрической генерации. К тому же твердотельные лазерные источники компактнее, надежнее, современнее, дешевле, более просты в обслуживании по сравнению с газовыми и жидкостными лазерами.

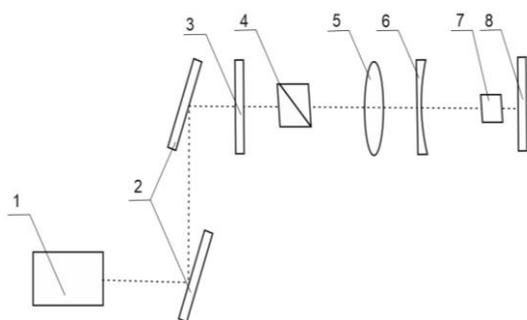
Наиболее распространенным ионом для лазеров видимого спектра является трехвалентный ион празеодима. При этом первая публикация о генерации на кристалле $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$ в видимой области на длине волны 599 нм датируется 1967 годом [1]. Однако бурное развитие лазеров на данном ионе началось сравнительно недавно. Группой исследователей из Института физики Гамбургского университета были получены прорывные результаты по ряду фторидных кристаллов с пра-

зеодимом [2]. Причем генерация была осуществлена на всех переходах видимой области спектра: 491, 500, 523, 546, 605, 607, 640, 670, 698, и 721 нм. При этом наиболее эффективным является лазер на длине волны 640 нм с максимальной выходной мощностью 2,9 Вт. Также своими работами с лазерами на кристаллах фторидов с ионами празеодима можно отметить группы проф. Монкорже из университета Канн (Франция) и проф. Каннари из университета Кейо (Япония). Среди празеодимсодержащих оксидных кристаллов (в частности на кристалле перовскита Pr:YAlO₃) успехов достигла группа проф. Елинковой из Пражского университета (Чехия) [3].

В данной работе сообщается о реализации непрерывного режима работы лазера на основе кристалла Pr:YLF в видимой области спектра при накачке излучением 2ω -OPSL с длиной волны 479 нм.

На рисунке 1 приведена схема макета непрерывного лазера на основе кристалла Pr:YLF. Для изготовления активного элемента 7 диаметром 5 мм и толщиной 5 мм, ориентированного перпендикулярно кристаллографической оси а, использовался кристалл $\text{Pr}^{3+}(0,6 \text{ ат.}\%):\text{YLF}$. Входная и выходная грани активного элемента были полированы для проведения лазерных экспериментов, напыление просветляющих покрытий не произво-

дилось. Активный элемент устанавливался на медном теплоотводе с водяным охлаждением, температура поддерживалась на уровне 20 °С. В качестве источника накачки использовался 2 ω -OPSL с длиной волны генерации 479 нм, максимальной выходной мощностью 5 Вт и M²-фактором 3. Полуволновая пластинка 3 служила для вращения плоскости поляризации. Поляризатор 4 обеспечивал поляризацию излучения с направлением вектора напряженности электрического поля E параллельно кристаллографической оси с (π – поляризация), что обеспечивало максимальное поглощение излучения накачки в кристалле. Линза 5 формировала перетяжку диаметром \sim 40 мкм внутри активного элемента 7. Резонатор был образован входным вогнутым зеркалом 6 с радиусом кривизны 10 мм и плоским выходным зеркалом 8. Покрытие входного зеркала обеспечивало высокое пропускание излучения накачки на длине волны 479 нм и высокое отражение на длинах волн генерации 640, 607, 523 нм. В качестве выходного зеркала использовались зеркала с селективным пропусканием на различных длинах волн генерации: 2,3 %, 3,5 %, 5,7 %, и 10,4 % на длине волны 640 нм; 3,4 %, 14,4 %, 23,5 % на длине волны 607 нм; 1,3 %, и 1,9 % на длине волны 523 нм.



1 – оптически накачиваемый полупроводниковый лазер; 2 – зеркала заводные; 3 – фазовая пластинка $\lambda/2$; 4 – поляризатор; 5 – линза фокусирующая; 6 – входное зеркало; 7 – активный элемент Pr:YLF; 8 – выходное зеркало

Рисунок 1 – Схема лазера на основе кристалла Pr:YLF

Максимальные дифференциальные эффективности лазерной генерации по поглощенной мощности накачки были получены для выходных зеркал с пропусканием 2,3 %, 14,4 % и 1,3 % на длинах волн 640, 607 и 523 нм, соответственно. На рисунке 2 приведены зависимости выходной

мощности лазера на основе кристалла Pr:YLF от поглощенной мощности накачки.

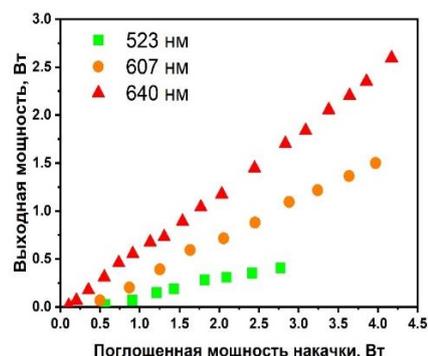


Рисунок 2 – Зависимость выходной мощности лазера на основе кристалла Pr:YLF от поглощенной мощности накачки

Максимальная выходная мощность 2,5 Вт получена на длине волны 640 нм при поглощенной мощности накачки 4,2 Вт. Дифференциальная эффективность лазерной генерации достигала 62 %. На длине волны 607 нм максимальная выходная мощность составила 1,5 Вт при дифференциальной эффективности 40 %. На длине волны 523 нм максимальная выходная мощность не превышала 0,4 Вт при поглощенной мощности накачки 2,75 Вт. Дальнейшее увеличение выходной мощности было ограничено влиянием термических эффектов в кристалле. При этом дифференциальная эффективность лазерной генерации на данной длине волны составила 21 %. На рисунке 3 приведены пространственные профили лазерных пучков на соответствующих длинах волн.

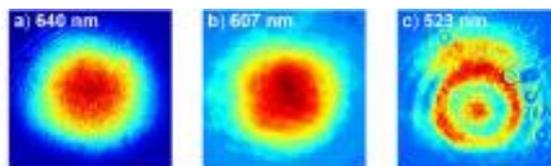


Рисунок 3 – Пространственные профили пучка лазера

Литература

1. Solomon, R. Stimulated emission at 5985 Å from Pr³⁺ in LaF₃ / R. Solomon, M. Mueller // Appl. Phys. Lett. – 1963. – № 3. – P. 135–137.
2. Out of blue: semiconductor laser pumped visible rare-earth doped lasers / C. Kränkel [et al.] // Laser Photonics Rev.– 2016. – № 10. – P. 548.
3. Diode-pumped Pr:YAP lasers / M Fibrich [et al.] // Las. Phys. Lett. – 2011. – № 8. – P. 559–568.

УДК 544.25

ХИРАЛЬНЫЕ ДОБАВКИ ДЛЯ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТРИЦ НА ОСНОВЕ НАНОГЛИНЫ, ЛЕГИРОВАННОЙ ЧЕТВЕРТИЧНЫМИ АММОНИЕВЫМИ СОЛЯМИЛуговский А. П.¹, Мицкевич Е. Д.², Гурский А. Л.², Луговский А. А.²,
Лапаник В. И.¹, Тимофеев С. В.¹¹НИУ «Институт прикладной физический проблем имени А. Н. Севченко» БГУ²Учреждение БГУ «Республиканский центр проблем человека»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной работе рассматривается добавление к нематическим и ферроэлектрическим жидким кристаллам наночастиц монтмориллонита, модифицированных четвертичной аммониевой солью, содержащей хиральные моно- и биарильные единицы, благотворно влияет на их свойства. Четвертичные аммониевые соли были приготовлены из легкодоступных ароматических гидроксикислот, хиральных спиртов и третичного амина.

Ключевые слова: жидкокристаллические соединения, монтмориллонит, нанокompозит; реакция Мицунобу.

CHIRAL ADDITIVES FOR LIQUID CRYSTAL MATRIXES BASED ON NANO-CLAY DOPED WITH QUATERNARY AMMONIUM SALTSLugovski A.¹, Mitskevich E.², Hurski A.², Lugovski A.², Lapanik V.², Timofeev S.²¹A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems²Republican Scientific Center for Human Issues of Belarusian State University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. In this work reported about additives of montmorillonite nanoparticles modified by a quaternary ammonium salt bearing chiral mono- and biaryl unit to nematic and ferroelectric liquid crystals have a beneficial effect on their properties. The quaternary ammonium salts were prepared from easily available aromatic hydroxyacids, chiral alcohols and a tertiary amine.

Keywords: liquid-crystalline compounds; montmorillonite, nanocomposite, Mitsunobu reaction.

Адрес для переписки: Мицкевич А. Д., ул. Академика Курчатова 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: fcfv12@gmail.com

Цель и предпосылки. Нанометровые композиты, состоящие из неорганических и органических соединений, привлекают интерес исследователей благодаря уникальным свойствам. Физические и электрооптические характеристики жидких кристаллов могут быть изменены путем добавления наночастиц [1]. Обладая большой площадью поверхности, высокой катионообменной емкостью и недорогой, монтмориллонитовая глина стала ключевым материалом, используемым для армирования систем жидких кристалл/глина [2]. Сообщалось, что добавление монтмориллонита, модифицированного четвертичным аммонием, в жидкие кристаллы благоприятно сказывается на характеристиках полученного материала [3]. Учитывая, что введение молекулярной хиральности в жидкие кристаллы является еще одним важным инструментом для получения продуктов с уникальными свойствами [4], мы синтезировали хиральные соли четвертичного аммония 7, модифицировали этими соединениями монтмориллонитовую глину и исследовали основные характеристики нематических и ферроэлектрических жидких кристаллов, допированных наночастицами.

Результаты и обсуждение. Синтез четвертичных аммониевых солей 7а-с, необходимых для модификации наночастиц, начинали с коммерческой

4-гидрокси-4-дифенилкарбоновой кислоты (1) или этил 4-гидроксibenзоата (8) представлен на рисунке. Сначала гидроксикислоту 1 этерифицировали *n*-бутанолом, а полученный эфир 2 вовлекали в реакцию Мицунобу с хиральными спиртами 3а и 3б. Восстановление сложноэфирной группы в 4а-б с помощью LiAlH₄ позволило получить бензиловые спирты 5а-б. Гидроксильная группа в 5а была преобразована в бромид реакцией с PBr₃, а 5б был преобразован в бромид 6б реакцией с HBr в уксусной кислоте при 80°С. Наконец, были получены целевые четвертичные аммониевые соли 7а-б путем нагревания бромидов 6а-б и додецилдиметиламина в бутаноне. Продукт 7с был синтезирован в соответствии с той же последовательностью шагов, что и для получения 7б, начиная с гидроксифира 8. Железистый допированный монтмориллонит был получен добавлением ацетонового раствора солей 5–7 к суспензии глины в воде.

В то время как монтмориллонит, допированный 7а и 7с, не оказывал влияния на свойства жидких кристаллов, добавление наночастиц, полученных из 7б, в ферроэлектрические жидкие кристаллы приводило к увеличению спонтанной поляризации на 30 %, угла наклона на 20 % и уменьшению шага спирали на 35 %. Кроме того, были исследованы диэлектрические и электрооптические свойства нематических жидких кристал-

лов, допированных такими наночастицами. Диэлектрическая анизотропия увеличилась для допированных смесей примерно в 1,3 раза, а пороговое напряжение и время переключения уменьшились на 30–40 %. Следует отметить, что

частицы такого типа равномерно смешиваются с жидкими кристаллами и длительное время удерживаются в объеме, предположительно, за счет межмолекулярных взаимодействий между молекулами ЖК и хиральным фрагментом.

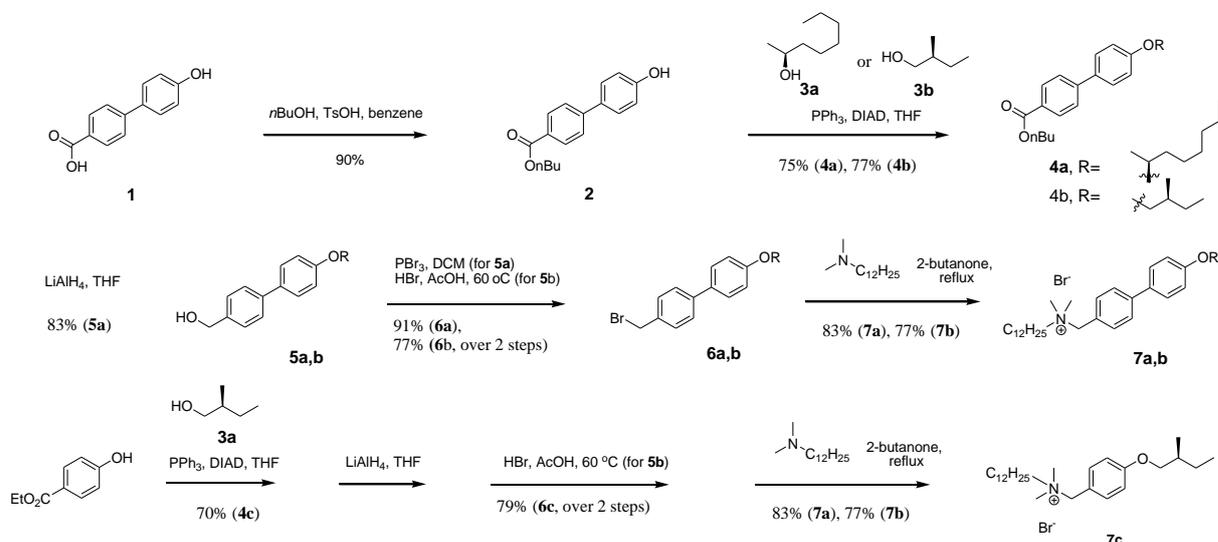


Рисунок – Синтез соединений 7а–с

Заключение. Таким образом, были получены три образца наноглины, допированной моно- или би-арилами, содержащими четвертичный аммониевый фрагмент и хиральную алкильную цепь. Эти органические молекулы были получены из ароматических гидроксикислот, которые соединялись с хиральными спиртами с помощью реакции Мицунобу. Образец наноглины, легированный 7b, оказывал положительное воздействие диэлектрические и электрооптические свойства нематических жидких кристаллов.

Литература

1. Preparation of TiO₂/polyaniline nanocomposite from a lyotropic liquid crystalline solution / L. Shi [et al.] // Syn. Met. – 2009. – V. 159. – P. 2525.

2. Nanoparticle-dispersed liquid crystals fabricated by sputter doping. / H. Yoshida [et al.] // Advanced Materials. – 2010. – V. 22, № 5. – P. 622–626.

3. Effect of the intercalated/exfoliated nanostructure on the phase transformations of smectic polyester/layered silicate hybrids: Reinforcement of the liquid-crystalline matrix / A. Martinez-Gomez, E. Perez, C. Alvorez. – 2009. – P. 1447.

4. Lapanik, V. Physico-chemical and electro-optical properties of liquid crystals doped with chemically modified nanocline minerals / V. Lapanik, A. Lugovsky, S. Timofeev // Journal of Belarusian State University. Physics. – 2020. – № 3. – С. 76.

5. Synthesis, Preparation, and Characterization of Liquid Crystal/Organo-Montmorillonite Nanocomposites / S. M. Yanic [et al.] // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2015. – V. 607, № 1. – P. 23–31.

УДК 535+537.86

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МОДЕЛИ КВАНТОВОГО ГАРМОНИЧЕСКОГО ОСЦИЛЛЯТОРА В КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ СВЕТА

Невдах В. В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Анализируется обоснованность используемого в квантовой теории света представления свободного электромагнитного поля как набора собственных типов колебаний или мод, каждой из которых ставится в соответствие квантовый гармонический осциллятор. Показано, что моды свободного электромагнитного поля не являются гармоническими осцилляторами.

Ключевые слова: квантовая теория света, свободное электромагнитное поле, мода поля, гармонический осциллятор.

ABOUT USING THE QUANTUM HARMONIC OSCILLATOR MODEL IN QUANTUM THEORY OF LIGHT

Nevdakh V.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The validity of the representation of the free electromagnetic field used in the quantum theory of light as a set of eigentypes of oscillations or modes, each of which is associated with a quantum harmonic oscillator, is analyzed. It is shown that free electromagnetic field modes are not harmonic oscillators.

Key words: quantum theory of light, free electromagnetic field, mode field, harmonic oscillator

Адрес для переписки: Невдах В. В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: nevdakh@bntu.by

Понятие собственных типов колебаний или мод резонатора является одним из основных понятий в физике лазеров. В квантовой теории света (излучения) свободное электромагнитное поле представляется как набор мод, каждой из которых ставится в соответствие квантовый гармонический осциллятор [1]. В работе анализируется обоснованность такого представления.

Гармоническим осциллятором в классической теории называют механическую систему, совершающую гармонические колебания. Примером может служить пружинный маятник – пружина с коэффициентом упругости k , прикрепленная к точечному грузу массой m . После снятия действовавшей на маятник упругой силы (в одномерном случае) $F = kx$, маятник совершает гармонические колебания, описываемые выражением [2]

$$x(t) = x_0 \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right), \quad (1)$$

где

$$\sqrt{\frac{k}{m}} = \omega \quad (2)$$

циклическая частота; x_0 – величина начальной деформации.

Работа внешней силы F по деформации пружины сохраняется в виде потенциальной энергии пружины, описываемой выражением

$$E_{pot}(t) = \frac{kx^2(t)}{2} = \frac{1}{2}kx_0^2 \cos^2\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right). \quad (3)$$

При движении маятника его потенциальная энергия переходит в кинетическую, величина которой определяется выражением

$$E_{kin}(t) = \frac{1}{2}m\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 = \frac{1}{2}kx_0^2 \sin^2\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right). \quad (4)$$

Из выражений (3) и (4) следует, что полная энергия маятника в любой момент времени, определяемая выражением

$$E(t) = E_{kin}(t) + E_{pot}(t) = \frac{1}{2}kx_0^2, \quad (5)$$

является величиной постоянной.

Из (3)–(5) следует, что в незатухающем классическом гармоническом осцилляторе через каждые четверть периода колебаний происходит полное преобразование потенциальной энергии в кинетическую и обратно, а его полная энергия в любой момент времени и в любой точке есть величина постоянная, равная максимальной потенциальной или кинетической энергии осциллятора.

Рассматриваемые в квантовой теории света собственные типы колебаний или моды электромагнитного поля являются стоячими волнами, образованными при интерференции бегущих волн в выбранном и обратном направлениях.

В классической теории излучения электромагнитная волна, распространяющаяся в вакууме, например, вдоль оси z , описывается выражениями для составляющих ее колебаний напряженностей электрического и магнитного полей в виде [3]

$$E_x = E_{x0} \cos(\omega t - kz) \quad (6)$$

и

$$H_y = -H_{y0} \sin(\omega t - kz), \quad (7)$$

где ω – циклическая частота, $k = 2\pi/\lambda$ – волновой вектор, λ – длина волны. Амплитуды колебаний полей связаны между собой соотношением

$$\sqrt{\varepsilon_0} E_{x0} = \sqrt{\mu_0} H_{y0}, \quad (8)$$

а величины ω и k соотношением

$$\frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = c, \quad (9)$$

где ε_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные вакуума; c – скорость света в вакууме. Плотность энергии электрического поля волны (6) описывается выражением

$$w_E(t, z) = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E_{x0}^2 \cos^2(\omega t - kz), \quad (10)$$

а плотность энергии магнитного поля волны (7) – выражением

$$w_H(t, z) = \frac{1}{2} \mu_0 H_{y0}^2 \sin^2(\omega t - kz). \quad (11)$$

Из (10) и (11) с учетом (8) следует, что в бегущей электромагнитной волне, описываемой выражениями (6) и (7), колебания плотностей энергии электрического и магнитного полей имеют одинаковые амплитуды, происходят во времени со сдвигом на четверть периода волны и в пространстве со сдвигом на четверть длины волны. В бегущей волне без потерь через каждые четверть периода колебаний происходит полное преобразование энергии электрического поля в энергию магнитного поля и обратно. Из (10) и (11) также следует, что плотность полной энергии такой волны без потерь является величиной постоянной

$$w = w_E + w_H = w_E^{max} = w_H^{max} = const. \quad (12)$$

Таким образом, изменения плотности энергии электрической и магнитной компонент бегущей электромагнитной волны без потерь, а также плотности ее полной энергии, происходят аналогично изменениям кинетической, потенциальной и полной энергии механического гармонического осциллятора. Следовательно, бегущую электромагнитную волну без потерь можно рассматривать как гармонический осциллятор.

Электрические и магнитные составляющие стоячих электромагнитных волн описываются выражениями [3]

$$E_{cm} = (2E_0 \cos kz) \cos \omega t \quad (13)$$

и

$$H_{cm} = -(2H_0 \cos kz) \sin \omega t. \quad (14)$$

Плотность энергии электрического поля стоячей волны описывается выражением

$$w_E(t, z) = (2\varepsilon_0 E_0^2 \cos^2 kz) \cos^2 \omega t, \quad (15)$$

а плотность энергии ее магнитного поля – выражением

$$w_H(t, z) = (2\mu_0 H_0^2 \cos^2 kz) \sin^2 \omega t. \quad (16)$$

Из (15) и (16) следует, что плотность полной энергии стоячей электромагнитной волны описывается выражением

$$w = w_E(t, z) + w_H(t, z) = 2\varepsilon_0 E_0^2 \cos^2 kz = 2\mu_0 H_0^2 \cos^2 kz = w(z). \quad (17)$$

Из (13)–(17) видно, что в полученной результирующей волне напряженности и плотности энергии электрического и магнитного полей колеблются во времени со сдвигом по фазе на $\pi/2$, через интервалы времени $\Delta t = T/4$ происходит полное преобразование энергии электрического поля в энергию магнитного поля и наоборот, и в волне без потерь полная энергия остается постоянной во времени. Однако в пространстве, напряженности электрического и магнитного полей колеблются в одинаковой фазе, в результате чего плотности энергии электрического и магнитного полей, а также полная энергия волны являются функциями координаты: есть точки в пространстве, в которых напряженности и плотности энергии обоих полей волны всегда равны нулю – это узлы, и точки, в которых напряженности и плотности энергии обоих полей всегда имеют максимальное значение – это пучности. Переноса энергии в пространстве в такой стоячей волне не происходит. Следовательно, из-за неоднородности распределения плотности полной энергии по координате (пространству) стоячая электромагнитная волна, в отличие от бегущей волны, не может рассматриваться как гармонический осциллятор.

Таким образом, в работе показано, что одно из основных положений квантовой теории света о том, что свободное электромагнитное поле может быть представлено как набор собственных типов колебаний или мод, каждой из которых ставится в соответствие квантовый гармонический осциллятор, является физически необоснованным и некорректным.

Литература

1. Скалли, М. О. Квантовая оптика / М. О. Скалли, М. С. Зубайри. – М.: Физматлит, 2003. – 512 с.
2. Holiday, D. Fundamentals of physics / D. Holiday, R. Resnick, J. Walker. – John Wiley & Sons, 2010. – 1330 p.
3. Невдах, В. В. Наука и техника / В. В. Невдах. – 2022. – Т. 21, № 3. – С. 222–228.

УДК 681.7.004.89

КОНТРОЛЬ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТИ**Олифер В. А., Савкова Е. Н., Фёдорцев Р. В.***Белорусский национальный технический университет**Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В статье рассматриваются актуальность использования оптических деталей. Представлены способы контроля качества изображения, воспроизводимого оптическими системами. Рассмотрена актуальность и доступность распознавания интерференционных картин нейросетью MatLab R2021a. Также представлен шаблон работы в данной программной среде. Приведены основные достоинства использования нейросети.

Ключевые слова: оптические детали, оптические системы, методы контроля, интерференционный метод, нейросеть.

CONTROL OF SURFACE SHAPE AND CURVATURE RADII USING A NEURAL NETWORK**Olifer V., Savkova E., Fedortsev R.***Belarusian National Technical University**Minsk, Republic of Belarus*

Annotation. The article discusses the relevance of the use of optical parts. The methods of image quality control reproduced by optical systems are presented. The relevance and accessibility of recognition of interference patterns by the MatLab R2021a neural network is considered. A template for working in this software environment is also presented. The main advantages of using a neural network are given.

Key words: optical details, optical systems, control methods, interference method, neural network.

*Адрес для переписки: Олифер В. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: olifer.vlad2003@yandex.ru*

Качество изображения, воспроизводимого оптической системой, во многом зависит от точности обработки радиусов кривизны сферических поверхностей деталей, которые находят широкое применение благодаря простоте их расчета, технологичности и возможности использование классических методов контроля. Методы контроля радиусов кривизны можно разделить на контактные – осуществляемые с помощью кольцевых сферометров и пробных стекол (интерференционный метод); и бесконтактные – например, на основе автоколлиматора и интерферометра [1]. На практике часто складываются ситуации, когда (рисунок 2, а) требуется высокая квалификация рабочего или контролера для точного контроля линз и оценки результатов измерений. Поэтому нейронная сеть может выполнить эту работу более качественно, быстрее и точнее, а также избежать без субъективных ошибок, кроме этого можем дополнить тренировочную базу интерференционных картин. А еще неоспоримым достоинством нейросети является возможность ее самообучение.

Сущность контактных методов на основе сферометра заключается в относительном измерении радиусов кривизны сферических поверхностей на основе контактного измерения высоты шарового сегмента этой поверхности [2]. В интерференционном методе используют пробное стекло, представляющее собой пластину, одна из поверхностей которой (измерительная, эталонная) имеет заданный радиус кривизны, а вторая плоская. При наложении измерительной поверх-

ности пробного стекла на испытуемую (контролируемую) поверхность проверяемой оптической детали между ними возникает воздушный зазор.

При соответствующем освещении пробного стекла и контролируемой детали возникает интерференция лучей света, отраженных от верхней и нижней границ воздушного зазора. Наблюдаемая визуально интерференционная картина воспроизводит профиль воздушного зазора и позволяет судить о кривизне испытуемой поверхности проверяемой оптической детали [1].

Качество поверхности оценивают по виду интерференционной картины в виде колец или полос. Данным методом контролируется отклонение радиуса кривизны рабочей поверхности от расчетной величины.

Если на контролируемую поверхность детали (К) радиусом R и диаметром D , наложить эталон (Э) радиусом $R_0 = R_3$ – оптический калибр радиус которого равен заданному на чертеже $R_k \approx R_3$, то

$$R = R_0 + 4N\lambda \frac{R_0^2}{D^2}$$

или

$$R_k = R_3 \pm \Delta R.$$

Из курса оптики известно, что интерференционное кольцо наблюдается при разности хода лучей $\lambda/2$. При $\lambda = 555$ нм толщина воздушного зазора h соответствующая одному кольцу равна 250 нм.

$$\Delta R = h = \frac{\lambda}{2} N.$$

О форме испытываемой поверхности судят по виду интерференционной картины. При симметричном осевом распределении воздушного зазора картина имеет вид концентрических колец, по числу которых определяют отступление радиуса контролируемой поверхности от R , [2].

$$\pm \Delta R = R_k - R_s$$

Плавное отклонение от заданной кривизны поверхности характеризуется величиной общей ошибки (N) (общая «яма» или общий «бугор») и выражается числом интерференционных колец (или полос для $R = \infty$). Метод позволяет определить не только величину отклонения радиуса кривизны, но и его знак по сбегу интерференционной картины к ее центру или краю при нажатии в центре пробного стекла, установленного на контролируемую поверхность.

Если при наложении пробного стекла интерференционная картина искажается (деформируется), то это говорит о наличии местных (локальных) погрешностей (ΔN) на поверхности контролируемой детали.

Нормы точности. Отступление колец или полос от правильной формы характеризуется величиной местных неровностей поверхности и называется местными ошибками. Их величина выражается в долях ширины интерференционной полосы (L) и обозначается ΔN . Наиболее типичными ошибками, при наложении испытываемой поверхности на пробное стекло, являются следующие (рисунок 1) [2].

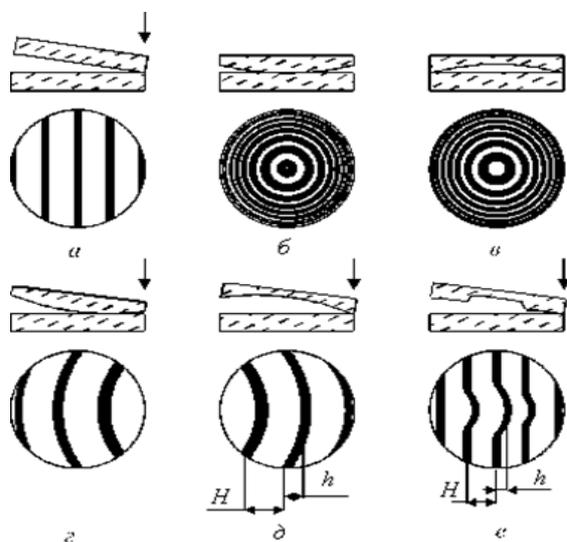


Рисунок 1 – Виды погрешностей поверхностей оптических деталей

Назначение допусков N и ΔN зависит от класса точности детали.

По первому классу (высокая точность) детали должны обрабатываться с погрешностью $N = 0,1-2,0$, а $\Delta N = 0,25-0,5$.

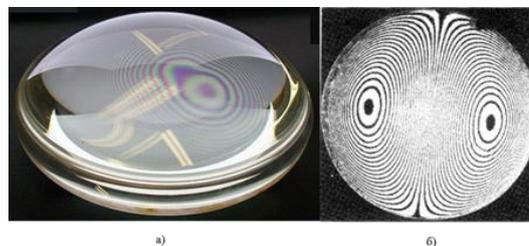
По второму классу (средняя точность) $N = 2,0-6,0$; $\Delta N = 0,5-2,0$.

По третьему классу (низкая точность N – не нормируется).

В случае, когда испытываемая поверхность является плоской и не имеет дефектов. Когда происходит нажатие при нажиме на край пробного или испытываемого стекла между ними возникает воздушный зазор в виде плоского клина. При таких обстоятельствах интерференционная картина имеет вид равноотстоящих прямых полос, параллельных ребру клина (рисунок 1, а).

В случае, когда испытываемая поверхность является выпуклой («бугор») или вогнутой («яма»), тогда интерференционная картина представляет собой ряд концентрических колец (рисунок 1, б и в). Определить знак кривизны можно путем равномерного нажима на края пробного или испытываемого стекла: в первом случае центр картины смещается к точке нажима (рисунок 1, г), во втором – в противоположную сторону (рисунок 1, д). Если кольца имеют форму окружности, то это указывает о равенстве кривизны поверхности детали в любом сечении. Неправильная форма колец указывает о различии кривизны поверхности в разных сечениях (рисунок 1, е).

Применение нейросети. Нейросеть может анализировать данные, оптимизировать процессы и автоматизировать рутинные задачи, связанные, например, с расчетом радиуса кривизны линз [3].



а – плохой поверхности линзы; б – сдвиговый интерферометр

Рисунок 2 – Интерференционная картина

Кроме этого, одним из перспективных направлений нейросети для контроля качества линз является сдвиговая интерферометрия, отличающаяся от классической интерференционной картиной (рисунок 2, б) и сложностью ее расшифровки. Таким образом, применение нейросети в этой области позволит лучше интерпретировать интерференционную картину [4].

Возможностей распознавания изображений с помощью нейронных сетей в программной среде MatLab R2021a. Где в качестве изображения служит интерференционная картина.

В качестве набора эталонных образов используются различные интерференционные картины от сдвигового интерферометра, плохих поверх-

ности, с различными видами погрешности, и идеальной поверхности линз.

Каждый образ формируем в виде графического файла в 8 битном черно-белом формате с разрешением 128×128 пикселей. После чего создают и обучают нейронную сеть. Затем приступают к запуску тестирования работы нейросети.

Таким образом, обучив нейросеть распознавать интерференционные картины можно оптимизировать работу систем в несколько десятков раз. А также предоставив для обучения большую базу данных, можно научить нейросеть находить малейшие отклонения, которые могут быть упущены при интерференционном методе [5].

Литература

1. Справочник технолога-оптика / М. А. Окатов [и др.]; под ред. М. А. Окатова. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехник, 2004. – 679 с.
2. Афанасьев, В. А. Оптические измерения. – М.: Высшая школа, 1981. – 232 с.
3. ГОСТ 59277-2020. Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта.
4. ГОСТ Р 70462.1-2022/ISO/IEC TR 24029-1-2021. Информационные технологии. Интеллект искусственный. Оценка робастности нейронных сетей. Часть 1.
5. Луис, С. Грокам машинное обучение. – СПб.: Питер, 2024. – 512с.

УДК 681.7.068

КВАЗИРАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК

Поляков А. В.¹, Ксенофонов М. А.²

¹Белорусский государственный университет

²НИУ «Институт прикладной физической проблем имени А. Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Описана квазираспределенная система измерения температуры с использованием мультиплексирования однородных волоконных брэгговских решеток с различными параметрами в качестве чувствительных элементов. На основе разработанной математической модели с помощью численного моделирования проведена оценка способов увеличения чувствительности и точности измерений для волоконных решеток Брэгга с металлизированным покрытием в диапазоне температур от –140 °С до +200 °С.

Ключевые слова: измеритель температуры, волоконная решетка Брэгга, металлическое покрытие, чувствительность.

QUASI-DISTRIBUTED FIBER-OPTIC TEMPERATURE SENSOR BASED ON METALLIZED FIBER BRAGG GRATINGS

Polyakov A.¹, Ksenofontov M.²

¹Belarusian State University

²A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of BSU
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A quasi-distributed temperature measurement system using multiplexing of homogeneous fiber Bragg gratings with different parameters as sensitive elements is described. Based on the developed mathematical model, numerical simulation is used to evaluate methods for increasing the sensitivity and measurement accuracy for fiber Bragg gratings with a metallized cladding in the temperature range from –140 °C to +200 °C.

Key words: Temperature meter, fiber Bragg grating, metal cladding, sensitivity.

Адрес для переписки: Поляков А. В., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: polyakov@bsu.by

В последние три десятилетия с развитием оптоэлектроники и волоконной оптики волоконно-оптические датчики (ВОД) прочно заняли свою нишу среди измерительных устройств благодаря таким уникальным свойствам как: пожаро-, взрыво-, искро-безопасность; устойчивость к химическим, механическим, коррозионным воздействиям; нечувствительность к влиянию электромагнитных помех; большая протяженность при небольшой массе; обеспечение мультиплексирования отдельных датчиков в сложные измерительные системы; возможность легкого сопряже-

ния с существующими волоконно-оптическими сетями и как следствие, передача информации на большие расстояния. На сегодняшний день разработаны ВОД измерения широкой номенклатуры физических величин, при этом наиболее массовое применение в различных областях находят ВОД температуры (ВОДТ).

Благодаря своим свойствам, ВОДТ находят применение в аэрокосмической отрасли, в том числе рассматриваются варианты установки на космические аппараты. В этой связи разработка и исследование способов улучшения характеристик

прецизионных температурных ВОД является актуальной задачей. Одним из оптимальных вариантов по сочетанию метрологических характеристик, а также простоты и надежности являются измерительные системы на основе квазираспределенных датчиков, представляющих собой массив точечных сенсорных элементов в виде волоконных брэгговских решеток (ВБР) в качестве преобразователя измеряемого физического воздействия в спектральный сдвиг отраженной брэгговской длины волны, объединенных одним общим световодом [1, 2]. Волоконная решетка Брэгга представляет собой дифракционную решетку, локализованную в сердцевине оптического волокна, которая образована за счет периодического изменения показателя преломления кварцевого стекла под воздействием лазерного излучения. Основными характеристиками решетки являются распределения амплитуды и периода модуляции показателя преломления (ПП), а также среднего значения наведенного ПП вдоль оси световода. Эти параметры задают спектральные, дисперсионные и энергетические свойства решеток и, таким образом, определяют их использование в различных приложениях волоконной оптики.

Коэффициент отражения от ВБР зависит от глубины модуляции показателя преломления, а центральная длина волны отраженного излучения определяется условием Брэгга:

$$\lambda_B = 2n_e \Lambda, \quad (1)$$

где λ_B – длина волны брэгговского резонанса, n_e – эффективный ПП сердцевины волокна для центральной длины волны, Λ – период брэгговской решетки.

При этом излучение на других длинах волн проходит через ВБР практически без потерь. Характеристики отражения зависят от параметров решетки. Принцип работы ВОДТ с использованием ВБР основан на зависимости изменения спектральных свойств отраженного излучения под воздействием температуры. Используя ВБР с различными параметрами, можно мультиплексировать большое число датчиков, проводя одновременные измерения в различных точках волокна на разных брэгговских длинах волн.

В роли температурного датчика, брэгговская решетка подвергается либо расширению, либо сжатию при изменении температуры. Это приводит к изменению периода решетки и эффективного показателя преломления. В результате, длина волны оптического сигнала, отражаемого от решетки, смещается согласно (1). Измеряя спектральное смещение отраженной длины волны, можно определить значение воздействующей на датчик температуры. Погрешность измерений ограничивается шириной спектральной линии отражения ВБР, чувствительностью спектроанализатора. Количество используемых ВБР определяется спектральной шириной источника

излучения, чувствительностью ВБР и требуемым диапазоном измерения температуры.

Сдвиг центральной длины волны отражения ВБР в зависимости от изменения температуры задается выражением [3]:

$$\delta\lambda_B = (\alpha + \xi)\lambda_B (T - T_n), \quad (2)$$

где α – результирующий температурный коэффициент линейного расширения структуры металл-волоконный световод; ξ – термо-оптический коэффициент; λ_B – брэгговская длина волны отражения при начальной комнатной температуре, $\lambda_B=1550$ нм; T_n – комнатная температура, $T_n = 20$ °С.

Термо-оптический коэффициент описывается формулой:

$$\xi = \frac{1}{n_e} \frac{\partial n_e}{\partial T}, \quad (3)$$

Температурную зависимость показателя преломления ВБР, сформированной в кварцевом оптоволокне с сердцевиной, легированной оксидом германия, аппроксимировали в виде:

$$n_e = 0,00194 \cdot \exp(T / 205,885 \text{ К}) + 1,46396. \quad (4)$$

В формуле (4) текущую температуру необходимо подставлять в Кельвинах.

Поскольку волоконно-оптические датчики температуры могут использоваться в космических аппаратах, важным фактором являются массогабаритные параметры. Показано, что толщина металлического покрытия не должна превышать 200 мкм, поскольку дальнейшее увеличение толщины не приводит к значительному возрастанию чувствительности датчика, однако увеличивает его массу, что учитывалось при дальнейших расчетах. В результате численного моделирования смещения брэгговской длины волны для решеток, покрытых никелем, алюминием, медью и без покрытия в диапазоне температур от 0 °С до +200 °С установлено, что наибольшей чувствительностью обладают решетки с алюминиевым покрытием. Зависимость сдвига брэгговской длины волны от температуры носит нелинейный характер и для алюминиевого покрытия чувствительность составляет 37 пм/°С в диапазоне температур 0–100 °С, что в 4,6 раз превосходит чувствительность ВБР с полимерным покрытием (8 пм/°С) и 58,8 пм/°С в диапазоне +120–200 °С, что в 3,4 раза превосходит ВБР с полимерным покрытием. При моделировании смещения брэгговской длины волны для решеток, покрытых никелем, алюминием, медью и без покрытия в диапазоне температур от –140 °С до 0 °С показано, что для указанного диапазона максимальная чувствительность увеличивается в 4 раза при использовании алюминиевого покрытия.

Из полученных зависимостей следует, что металлизирование ВБР приводит к увеличению чув-

ствительности температурного датчика, что снижает требования к ширине спектра отражения ВБР и разрешающей способности спектроанализаторов при сохранении требуемой точности измерения. С другой стороны, расширение интервала сдвига брэгговской длины волны излучения в зависимости от изменения температуры приводит к уменьшению количества решеток, которые можно мультиплексировать в пределах ширины спектра излучения оптического источника в 3,5 раза при выполнении условия отсутствия наложения спектров соседних ВБР при их смещении во всем измеряемом интервале температур.

Литература

1. On-line temperature measurement of fiber Bragg gratings inside a fiber laser / Z. Zhoua [et al.] // *Optical Fiber Technology*. – 2018. – V. 45, № 7. – P. 137–140.
2. Разработка и исследование волоконно-оптического датчика температуры на основе регенерированной волоконной брэгговской решетки / Д. А. Коннов [и др.] // *Оптический журнал*. – 2024. – Т. 91. – № 5. – С. 66–71.
3. Li, Y. Temperature sensing characteristics of metal coated FBG during dynamic cooling process / Y. Li, K Yang., X. Li // *Optical Fiber Technology*. – 2018. – V. 45, № 9. – P. 368–375.

УДК 621.327

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ГАЗОРАЗРЯДНЫЙ ИСТОЧНИК УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СПЛОШНОГО СПЕКТРА

Потапенко А. О.

*ООО «Научно производственное предприятие «Мелитта»
Москва, Российская Федерация*

Аннотация. Работа посвящена экспериментальным исследованиям излучательных характеристик в бактерицидной области спектра открытых короткодуговых сильнотоочных разрядов в ксеноне. Экспериментальные исследования радиационных характеристик разряда выполнены в диапазонах давления ксенона от 2 до 6 атм, электрических энергий от 0,2 до 2,0 Дж при рабочих напряжениях на электродах от 0,9 до 3,3 кВ, межэлектродных зазорах 4 и 6 мм. Определены режимы разряда, обеспечивающие выход излучения в спектральной области 200 – 300 нм, до 14% от вложенной в разряд энергии.

Ключевые слова: сильнотоочный разряд, ксенон, короткодуговая лампа, бактерицидное УФ излучение, плазменный канал.

A HIGHLY EFFICIENT PULSED GAS-DISCHARGE SOURCE OF CONTINUOUS-SPECTRUM ULTRAVIOLET RADIATION

Potapenko A.

*Scientific and Industrial Enterprise Melitta, Ltd.
Moscow, Russian Federation*

Abstract. The paper is devoted to experimental studies of the radiative characteristics in the bactericidal range of the spectrum of unlimited short-arc high-current discharges in xenon. Experimental studies of the radiation characteristics of the discharge were performed in the ranges of xenon pressure from 2 to 6 atm, electrical energies from 0.2 to 2.0 J at operating voltages at electrodes from 0.9 to 3.3 kV, interelectrode gaps of 4 and 6 mm. Discharge modes that provide radiation output in the spectral range of 200-300 nm, up to 14% of the energy invested in the discharge have been determined.

Keywords: high-current discharge, xenon, short-arc flashlamp, biocidal UV-radiation, plasma channel.

Адрес для переписки: Потапенко А. О., ул. Миклухо-Маклая, д. 16, г. Москва 10117997, Российская Федерация, e-mail: alexeu1999pt@gmail.com

В настоящее время ультрафиолетовые источники сплошного спектра (импульсные ксеноновые лампы и ртутные лампы среднего давления) широко применяются для обеззараживания различных объектов и деструкции органических загрязнителей в воде и воздухе [1, 2]. Наибольшее распространение получили лампы трубчатой геометрии с различной конфигурацией плазменного канала. Основным недостатком такого типа ламп является ограничение удельной мощности плазменного канала, которая определяет его радиационные характеристики, связанное с ускоренной

деградацией кварцевой оболочки и ее преждевременным разрушением.

Свободно расширяющийся плазменный канал позволяет многократно увеличить удельную мощность, что должно обеспечить формирование импульсной дуги с оптимальными значениями плотности и температуры плазмы, для генерации УФ-излучения в требуем спектральном интервале, определяемом фотохимическими прикладными задачами.

Методика и аппаратура. Исследования проводились с экспериментальными образцами ко-

роткодуговых ламп шаровой формы, подробно описанных в [3]. Два электрода, расположенные соосно, являлись анодом и катодом. Третий электрод, расположенный на расстоянии 2 мм от катода использовался в качестве источника плазмы, формирующий проводящую область в разрядном промежутке. Разрядный контур состоял из емкостного накопителя с конденсаторами, емкость которых составляла от 0,1 мкФ до 2 мкФ. Конструкция разрядного контура и его расположение относительно короткодуговой лампы отвечало требованию минимизации индуктивности контура для обеспечения максимальной эффективности преобразования электрической энергии, запасаемой в конденсаторах в энергию плазменного канала. Зазор между разрядными электродами в лампах составлял 4 и 6 мм. Экспериментальные образцы ламп заполнялись ксеноном до давления 2, 4 и 6 атм. Исследования радиационных характеристик разряда исследовались при изменении рабочего напряжения от 0,9 до 3,3 кВ.

Учитывая, что задача оптимизации электро-мощностных характеристик разряда с учетом параметров газовой среды с целью получения максимального выхода УФ-излучения является многопараметрической, был проведен цикл исследований радиационных характеристик плазменного канала в зависимости от его размеров, давления ксенона, мощности и энергии разряда.

Регистрация электрических характеристик плазменного канала осуществлялась с помощью калиброванного малоиндуктивных делителя напряжения Pintek HVP-39Pro и пояса Роговского (производства ИПС). Регистрация радиационных характеристик плазменного канала проводилась калиброванным спектрометром AvaSpec-ULS2048CL-1-RS-EVO. Все электрические сигналы регистрировались запоминающим осциллографом Tektronix TDS-2014C.

Результаты. Разрядный ток имеет колебательный характер с сильным затуханием. Логарифмический декремент затухания составляет 2 при вложенных в разряд энергиях 0,5 Дж и снижается до 1 при увеличении энергии до 1,5 Дж. В первый полупериод длительностью от 0,4 до 1 мкс (в зависимости от емкости конденсатора) в плазменный канал вкладывается от 75% до 95 % от запасаемой в конденсаторе энергии. Характерные значения активного сопротивления плазменного канала в момент максимума разрядного тока составляют от 0,25 до 1,2 Ом в зависимости от вложенной в разряд энергии от 1,5 Дж до 0,25 Дж.

Уменьшение длины разрядного канала сопровождается снижением активного сопротивления и выхода УФ-излучения. Например, при вложенной в разряд энергии 1 Дж выход в области 200 – 300 нм, для канала длиной 4 мм составляет 7 %, а для канала 6 мм увеличивается до 12 %.

Спектр излучения (рисунок 1) во всех исследуемых режимах работы короткодуговых ламп с различным наполнением имеет характерное распределение по спектру энергии.

Видно, что спектральная плотность энергии излучения имеет наибольшие значения в области длин волн от 220 до 280 нм, что близко к спектральному распределению излучателя абсолютно черного тела с яркостной температурой 12–14 кК. На данную область спектра накладывается молекулярный континуум и уширенные линии атомов ксенона. Изменение давления и плотности мощности приводят к заметному увеличению/уменьшению эффективности доли УФС-излучения в общем спектре излучения с сохранением спектрального распределения энергии в видимой области.

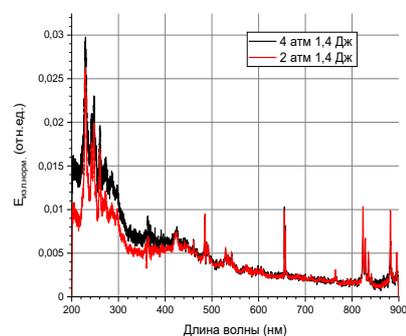


Рисунок 1 – Спектры излучения

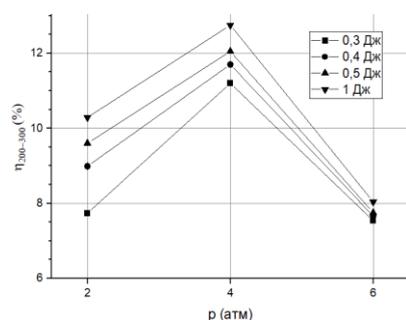


Рисунок 2 – Зависимость эффективности от давления при различной вложенной энергии

Наиболее сильное влияние на эффективность генерации излучения в коротковолновой области ультрафиолета (короче 280 нм) оказывает давление ксенона. На рисунке 2 представлена зависимость эффективности генерации УФС-излучения (200–300 нм) для импульсных ламп с наполнением ксенона до давления 2, 4 и 6 атм. При различных вложенных в разряд энергиях (от 0,3 до 1 Дж). Представленные результаты на рисунке 2 показывают, что с увеличением давления влияние плотности мощности (энергии) на выход УФС-излучения снижается и при давлениях 6 атм режимы работы ламп по эффективности практически не отличаются. Наибольшая эффективность генерации УФС-излучения наблюдалась при давлениях

ксенона 4 атм, которая достигала значений 12 % от вложенной в разряд энергии.

Достигнутые значения уровня бактерицидных потоков сохранялись при работе ламп в частотных режимах от 10 до 100 Гц. Электрод инициирующий формирование плазменного канала обеспечивал устойчивое его положение относительно разрядных электродов, что позволило в частотном режиме работы ламп зафиксировать его пространственное расположение и высокую стабильность повторения импульсов УФ-излучения.

Полученные результаты демонстрируют возможность создания высокоэффективных импульсных генераторов УФ-излучения с компактным телом излучения, работающих с частотами от еди-

ниц до сотен Гц, обладающих высокой стабильностью УФ-потока, для оптикоэлектронных систем различного назначения (медицина, экология, фотохимия и т. д.)

Литература

1. Ушаков, И. Стерилизующий свет / И. Ушаков, Н. Новикова, С. Шашковский // Наука в России. – 2011. – № 6 (186). – С. 11–16.
2. Плазменно-оптические технологии обеззараживания и обезвреживания объектов среды обитания / В. П. Архипов // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2011. – С. 120–134.
3. Импульсная короткодуговая трехэлектродная газоразрядная лампа для оптикоэлектронных систем УФ-обеззараживания: сб.ст./ 16-я междунар. науч. тех. конф. «Приборостроение – 2023», Минск, 2023.

УДК 628.9.037

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУЧЕНИЯ СТЕКЛОЛЮМИНОФОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Трофимов Ю. В.¹, Лишик С. И.¹, Сурвило Л. Н.¹, Грушко Н. Н.¹, Цвирко В. И.¹, Комса О. С.¹, Фан Ц.²

¹РНПУП «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси»

Минск, Республика Беларусь

²Фуданский университет

Шанхай, Китай

Аннотация. Разработаны образцы стеклолюминофоров на основе боросиликатной стеклообразующей системы и алюмоиттриевого граната. Исследованы светотехнические характеристики в зависимости от концентрации, толщины и степени полировки. Полученные образцы термически и химически стабильны, сохраняют эффективность преобразования излучения люминофором при накачке лазером мощностью 1 Вт.

Ключевые слова: стеклолюминофорный преобразователь, алюмоиттриевый гранат, трафаретная печать.

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS FOR PRODUCTION OF PHOSPHOR-IN-GLASS CONVERTERS

Trofimov Yu.¹, Lishik S.¹, Survilo L.¹, Hrushko N.¹, Tsvirko V.¹, Komsa O.¹, Fan J.²

¹SE “Center for LED and Optoelectronic Technologies of the NAS Belarus”

Minsk, Republic of Belarus

²Fudan university

Shanghai, China

Abstract. Samples of glass phosphors based on a borosilicate glass-forming system and yttrium aluminium garnet have been developed. The lighting characteristics were studied depending on the concentration, thickness and degree of polishing. The resulting samples are thermally and chemically stable and retain the efficiency of radiation conversion by the phosphor when pumped by a 1 W laser.

Key words: phosphor-in-glass converter, yttrium aluminium garnet, screen printing.

Адрес для переписки: Лишик С. И., Логойский тракт, 20, г. Минск 220090, Республика Беларусь
e-mail: Rnd@ledcenter.by

Большинство белых светодиодов представляют собой синий светодиодный кристалл, покрытый органическим полимером, содержащим желтый люминофор. Такое изделие имеет ограниченную яркость, поскольку высокие уровни плотности излучения накачки приводят к тепловому разрушению полимерной матрицы люминофорных преобразователей (ЛП). Разработка полупроводниковых источников белого света с высокой яркостью требует высокостабильных ЛП для применения в специализированных источниках осве-

щения и сигнализации, автомобильных фарах, информационных проекторах и пр. Благодаря своим превосходным оптическим свойствам, химической, термической стабильности и низкой стоимости стекло является идеальным выбором для белых источников света, у которых накачкой служит синий лазерный диод (ЛД). [1].

Экспериментальная часть. В рамках данной работы были разработаны и исследованы стеклолюминофорные композиции на основе порошков боросиликатного стекла, алюмо-иттриевого гра-

ната $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$ (YAG), оксинитридного люминофора $CaAlSiN_3:Eu^{2+}$, а также связующим этилцеллюлозой в терпинеоле. Концентрация люминофора варьировалась в пределах от 10 до 40 %.

Нанесение стеклолюминофоров на ситалловые подложки осуществлялось методом трафаретной печати в 1–4 слоя (толщина 1 слоя ~ 60 мкм).

Термическая обработка образцов выполнялась в муфельной печи в диапазоне температур от 650 до 725 °С в течении 30–60 мин для определения оптимального режима и включала предварительную стадию выжигания связующего.

Для измерения оптических характеристик образцов использовался спектрорадиометр CAS140D с интегрирующей сферой ISP500 диаметром 500 мм. Для возбуждения образцов применялся ЛД PLTB450B (444 нм, оптическая мощность до 1,6 Вт).

Шлифовка с мелкозернистой шлифовальной бумагой P1200 и полировка с помощью алмазного абразива с размером частиц 1 мкм на черном фетре осуществлялась с использованием шлифовально-полировального станка eGP-1D (Китай).

Микрофотографии образцов получены с использованием микроскопа МИКРО 200Т-01.

Результаты и обсуждение. Типичная зависимость светового потока от мощности ЛД приведена на рисунке 1. В зависимости от концентрации люминофора максимальное значение светового потока составляло 45–70 лм, а мощность ЛД 0,45–0,78 Вт.

Максимальное значение светового потока при более высоком уровне лазерного возбуждения наблюдалось при концентрации люминофора 10 %. Дальнейшее увеличение концентрации люминофора приводило к снижению светового потока, что обусловлено концентрационным и температурным гашением фотолюминесценции.

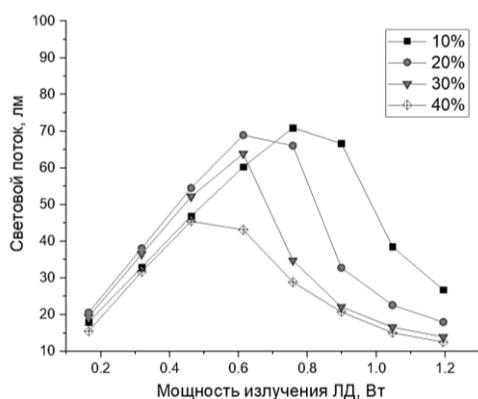


Рисунок 1 – Типичные зависимости светового потока стеклолюминофорных образцов от мощности излучения ЛД и концентрации люминофора (толщина 60 мкм, 1 слой)

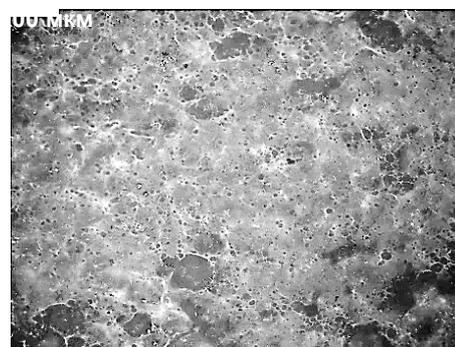
Однако при повышении температуры термообработки наиболее оптимальной являлась концентрация люминофора 20 %.

В таблице 1 приведены светотехнические характеристики источника света с различными образцами ЛП в зависимости от их толщины при концентрации люминофора 10 %.

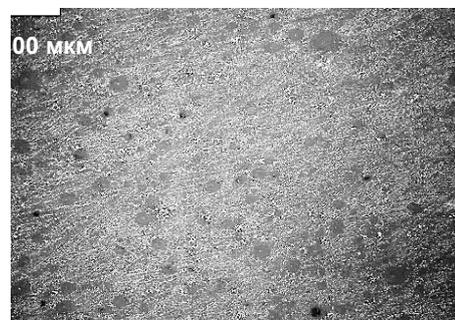
Увеличение толщины образцов путем нанесения методом трафаретной печати 3–4 слоев стеклолюминофорной композиции (образцы № 2, 3) приводило к повышению светового потока до 98–107 лм (увеличение на 42–52 %). Причем при однократном отжиге (образец № 2) генерируемый световой поток был несколько больше, чем при многократном отжиге (образец №3). Предположительно, более низкая эффективность образца №3 объясняется тем, что при многократном отжиге образуется граница раздела слоев. Дальнейшее увеличение толщины образцов приводит к снижению их светоотдачи, что обусловлено ухудшением теплоотвода и снижением эффективности люминофора.

Таблица 1 – Характеристики образцов ЛП

Образец	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Концентрация люминофора, %	10			
Количество слоев	1	4	3	4
Толщина, мкм	60	190	190	140
Макс. световой поток, лм	71	107	98	137
Мощность ЛД, Вт	0,76	0,97	0,92	1,12
Индекс цветопередачи CRI	–	–	–	68
КЦТ, К	–	31000	–	8250



а



б

Рисунок 2 – Микрофотографии поверхности образцов до (а) и после (б) шлифовки

Также исследовалось влияние степени полировки образцов на их светоотдачу. Как было показано ранее [2], минимизация шероховатости поверхности улучшает светоотдачу стеклолюминофорных образцов. На рисунке 2 представлены микрофотографии образцов стеклолюминофорных пленок до (образец № 2) и после (образец № 4) полировки. После полировки толщина ЛП №2 уменьшилась до 140 мкм (образец № 4). При этом максимальное значение светового потока ЛП увеличилось на 28 % при увеличении максимально допустимой мощности ЛД на 15 %, а коррелированная цветовая температура (КЦТ) уменьшилась с 31000 К до 8250 К. Изменение КЦТ объясняется снижением доли синего излучения ЛД, рассеивающегося микрошероховатой поверхностью ЛП.

Важным параметром белых источников света с ЛП являются общий индекс цветопередачи (CRI). Для достижения приемлемых значений CRI

(~86) в состав стеклолюминофорной композиции вводился красный $\text{CaAlSiN}_3:\text{Eu}^{2+}$ люминофор.

Таким образом, разработаны эффективные стеклолюминофорные композиции на основе боросиликатного стекла, YAG и нитридного люминофоров, обладающие высокими светотехническими характеристиками, а также термо-, фото- и химической стабильностью.

Литература

1. Chung, W. A Review on Phosphor in Glass as a High-Power LED Color Converter: a review / W. J. Chung, Y. H. Nam // Journ. of Sol. State Scie. Technol.–2020.–V.9.– 016010.
2. Enhancing luminous flux and color rendering of laser-excited $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$ single crystal phosphor plate via surface roughening and low-temperature sintering a $\text{CaAlSiN}_3:\text{Eu}^{2+}$ phosphor-in-borate glass / W. Chen [et al.] // J. of Luminescence–2022. – V. 251.

УДК 621.375.826

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ТЕА ЛАЗЕР С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ЛИНИЙ ГЕНЕРАЦИИ Шавель С. С., Горобец В. А., Бушук С. Б.

*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Предложен, разработан и реализован ТЕА лазер с быстрой (время переключения 0,2 секунды) последовательной генерацией импульсов на нескольких длинах волн в существенно отличающихся между собой спектральных диапазонах (1,0–4,0 и 9,2–10,8 мкм.) Переключение между каналами генерации осуществляется за счет последовательного внесения в каждый из каналов непрозрачной маски, которая блокирует генерацию в каждом резонаторе и оставляет прозрачное окно только для генерирующей линии в соответствии с заданным алгоритмом. Разработанный лазер может быть использован в качестве источника излучения в дистанционном газоанализаторе.

Ключевые слова: ТЕА лазер, инертные газы, CO_2 .

MULTI-WAVE TEA LASER WITH FAST SWITCHING OF GENERATION CHANNEL Shavel S., Gorobets V., Bushuk S.

*State Research and Production Association “Optics, optoelectronics and laser technology”
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. A TEA laser with fast (switching time 0.2 seconds) sequential generation of pulses at several wavelengths in significantly different spectral ranges (1.0–4.0 and 9.2–10.8 μm) has been proposed, developed and implemented. Switching between generation channels is performed by sequentially introducing an opaque mask into each channel, which blocks generation in each cavity and leaves a transparent window only for the generating line in accordance with a special algorithm. The developed laser can be used as a radiation source in a remote gas analyzer.

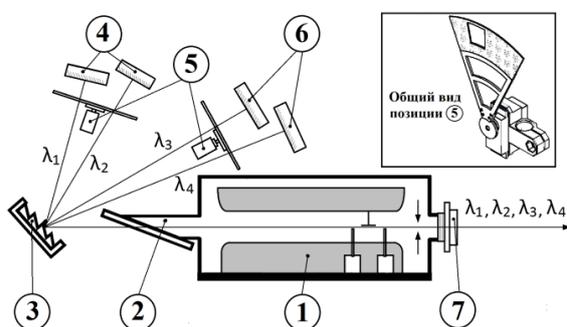
Key words: TEA laser, inert gases, CO_2 .

*Адрес для переписки: Шавель С.С., пр. Независимости, 68, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: shavel_s07@mail.ru*

Введение. В работе представлены результаты по получению в ТЕА лазерной системе с улучшенной конструкцией лазерной генерации с пиковой выходной мощностью в 10 и более кВт в нескольких спектральных диапазонах за счет использования комбинированной газовой смеси, содержащей помимо молекул CO_2 инертные газы, в которых реализуется генерация на электронных

переходах. Однако проведенные исследования показали, что для практического использования в дистанционных газоанализаторах необходимо максимально уменьшать взаимовлияние каналов генерации, что само по себе является сложной научно-технической задачей. Важно также обеспечить простое и надежное разделение каналов генерации в приемном тракте.

Все эти условия легко выполняются при переходе к квазиодновременной генерации, при которой происходит быстрое переключение между каналами, достаточное для выполнения условий «замороженной атмосферы» (десять доли секунды). При этом происходит разделение импульсов на разных длинах волн по времени следования, а процессы перекачки энергии между каналами генерации отсутствуют. Техническим препятствием к реализации подобной схемы работы является сложность быстрой механической перестройки по линиям генерации. В настоящей работе предложено решить эту проблему за счет применения неавтоколлимационной многоволновой схемы резонатора [1], в которой в каждом из каналов генерации попеременно вносятся блокирующие генерацию элементы (рисунок).



1 – разрядная камера; 2 – окно Брюстера;
3 – дифракционная решетка; 4 – отражающие зеркала резонатора (диапазон 1–4 мкм);
5 – электромеханический узел с блокирующим элементом; 6 – отражающие зеркала резонатора (диапазон 9,2–10,8 мкм); 7 – выходное зеркало резонатора

Рисунок – Оптическая схема лазера

Из рисунка видно, что основным отличием предложенной схемы от схемы резонатора [1], в которой происходит одновременная генерация на нескольких длинах волн, является наличие синхронизованных между собой электромеханических узлов, обеспечивающих блокировку каналов непрозрачной

маской. Узлы выполнены на базе цифровых сервоприводов, подключенных к управляющей плате с микроконтроллером Arduino и работающих по вновь созданному запрограммированному алгоритму. Для изменения положения непрозрачной маски в нужный момент времени управляющая плата имеет синхронизацию с блоком управления лазерным излучением. Предложенная схема позволяет переключать каналы за время порядка 0,2 секунды. При этом, генерация на возможных длинах волн осуществляется последовательно по заданной программе и может быть легко использована в приемном устройстве газоанализатора для идентификации импульсов.

Заключение. Таким образом, продемонстрирована возможность получения в реализованной ТЕА лазерной системе последовательной генерации импульсов в диапазонах 1,0–4,0 и 9,2–10,8 мкм за счет использования комбинированной газовой смеси, включающей небольшое количество инертных газов, молекул углекислого газа и буферного газа, например, Хе:СО₂:Не.

Применение разработанного оптомеханического модуля позволяет, за счет реализации режима последовательной генерации импульсов, легко модифицировать широко распространенные лазеры для использования в качестве источника излучения в газоанализаторах, работающих по дифференциальному методу (применение «on-» и «off-» линий для каждого измеряемого газа). Следует отметить, что разрядная камера и источник питания лазера конструктивно идентичны типичным ТЕА СО₂ лазерам, что позволяет создавать лазерные источники для дистанционных газоанализаторов с минимальными затратами на разработку и использование минимального количества комплектующих.

Литература

1. ТЕА лазер, генерирующий в нескольких спектральных диапазонах / С. С. Шавель [и др.]. – Журнал прикладной спектроскопии. – 2023. – Т. 90, № 6. – С. 835–842.

УДК621.3.021.866

ШИРОКОАПЕРТУРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИК ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОВЫШЕННОЙ ЛУЧЕВОЙ ПРОЧНОСТЬЮ

Шаронов Г. В.¹, Гасенкова И. В.², Мухуров Н. И.²

¹ НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ

² ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработаны физико-технические принципы и технология изготовления широкоапертурных преобразователей ИК лазерного излучения с повышенной лучевой прочностью путем модифицирования микро- и наноструктур пористого анодного оксида алюминия антистоксовыми люминофорами на основе оксихлоридов редких земель.

Ключевые слова: антистоксовый люминофор, модифицирование, преобразователь, визуализация, пористый оксид алюминия.

ШИРОКОАПЕРТУРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИК ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОВЫШЕННОЙ ЛУЧЕВОЙ ПРОЧНОСТЬЮ

Sharonov G.¹, Gasenkova I.², Mukhurov N.²

¹Sevchenko Institute of Applied Physics Problems Belarusian State University

²SSPA “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology” National Academy of Sciences of Belarus

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Physical and technical principles and technology for manufacturing wide-aperture IR laser radiation converters with increased radiation strength have been developed by modifying micro- and nanostructures of porous anodic aluminum oxide with anti-Stokes phosphors based on rare earth oxochlorides. Keywords:

Key words: anti-Stokes phosphor, modification, converter, visualization, porous aluminum oxide.

Адрес для переписки: Шаронов Г.В., ул. Курчатова 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: sharonovgv@yandex.by

Для визуальной регистрации полей ИК лазерного излучения успешно применяются антистоксовые люминофоры (АЛ) [1–3]. Разработка преобразователей инфракрасного лазерного излучения на основе редкоземельных элементов, обладающих интенсивной ап-конверсионной люминесценцией, является одним из перспективных направлений в оптоэлектронике и лазерной технике.

В настоящее время излучение волоконных лазеров с длиной волны 1,07 мкм с выходной мощностью 1–10 кВт широко используется в технологии лазерного упрочнения поверхности и раскря материалов. Отсутствие визуальных средств, позволяющих осуществлять настройку, юстировку, наведение и контроль однородности распределения ИК-излучения лазера при больших полях обрабатываемой поверхности, существенно усложняет работу с такими технологическими комплексами. Высокая плотность мощности излучения при использовании стандартных методов регистрации полей приводит к быстрому выгоранию люминофора.

Целью настоящей работы является разработка технологии изготовления широкоапертурных преобразователей ИК лазерного излучения на основе подложек из алюминиевого сплава с покрытием на основе пористого анодного оксида алюминия (ПАОА) с внедренными в поры частицами АЛ. Сочетание такой композиции ПАОА и АЛ позволяет создать широкоапертурные люминес-

цирующие экраны для визуализации ИК излучения лазеров с повышенной лучевой прочностью.

Технологический процесс изготовления преобразователей включал следующие основные операции:

– изготовление подложек из особо чистых сплавов алюминия с 2–6 % содержанием магния марки АМг-2, АМг-6 с использованием технологии алмазного точения;

– анодирование и выращивание на поверхности подложки однородного оксидного слоя с ячеисто-пористой структурой требуемой толщины более 10 мкм;

– приготовление шихты люминофора на основе оксихлоридов редких земель и ее нанесение на поверхность ПАОА с использованием связующих материалов с высокой адгезионной стойкостью.

Люминофоры наносились на поверхность оксида алюминия в виде мелкозернистого порошка, таким образом, чтобы нано- и микрочастицы люминофора глубоко проникали в поры диэлектрического слоя оксида алюминия, практически полностью закупоривая их. Были изготовлены экспериментальные образцы широкоапертурных преобразователей ИК лазерного излучения, схематическое изображение которых приведено на рисунке 1, а. Конструкция преобразователя состоит из подложки из алюминиевого сплава 1, на которой сформирован слой анодного оксида алюминия 2 с периодическим расположением пор 3.

Поры заполнены наночастицами АЛ. Под действием ИК лазерного излучения 4 наночастицы люминесцируют в видимом диапазоне.

Для изготовления преобразователей и визуализации мощных потоков лазерного излучения использовались 2 типа антистоксовских люминофоров, осуществляющих преобразование ИК-излучения лазеров в видимое в зеленой 0,54–0,56 мкм и красной 0,64–0,66 мкм спектральных областях свечения.

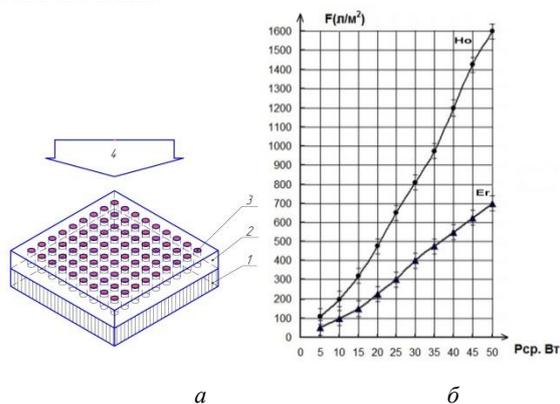


Рисунок 1 – Схематическое изображение конструкции преобразователя на основе ПАОА и АЛ (а) и зависимости яркости свечения люминофора в синтезированных оксихлоридных комплексах $GdOCl:Yb:Ho$ в зеленой области спектра (кривая 1Ho) и $GdOCl:Yb:Er$ (кривая 2Er) в красной области спектра на поверхности ПАОА при изменении средней мощности излучения от 5 Вт до 50 Вт

Повышение лучевой прочности преобразователя обеспечивалось за счет хорошей адгезии АЛ к подложке и высокой теплопроводности подложки из алюминиевого сплава, рассеивающей избыточное тепло от воздействия лазерного излучения, при этом принципиальных ограничений по линейным размерам регистрируемых полей не имеется. Были проведены измерения абсолютных значений яркости видимой люминесценции разработанных преобразователей в зависимости от мощности возбуждения, рисунок 1б. Измерения проводилось с использованием цифрового фотодидного люксметра в спектральном диапазоне (320–730) нм. Источником излучения служил волоконный лазер с модуляцией добротности со средней мощностью (5–50) Вт на длине волны 1,07 мкм. Исследуемый образец помещался под углом 90 град к падающему излучению.

Видно, что при изменении средней мощности возбуждающего излучения квазинепрерывного волоконного лазера с модуляцией добротности в

диапазоне от 5 до 50 Вт изменение яркости свечения антистоксовой люминесценции носит в значительной мере линейный характер. Это показывает на высокую эффективность антистоксового преобразования света синтезированным кристаллическим материалом. Это можно объяснить невысокой импульсной мощностью волоконного лазера порядка 1,0–10 кВт.

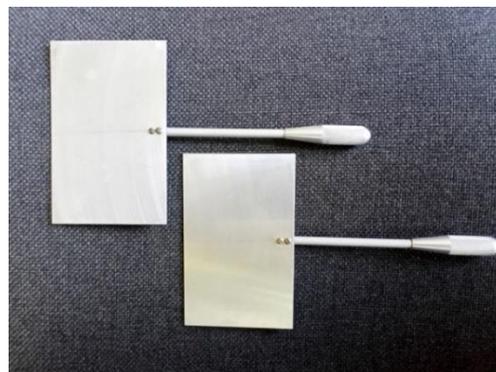


Рисунок 2 – Общий вид разработанных преобразователей ИК лазерного излучения, размер поля (80×60) мм

Проведены исследования преобразователей на лучевую прочность. Общий вид изготовленных преобразователей приведен на рисунке 2. Измерения проводились с использованием 200 Вт АИГ: Nd^{+3} – лазера с непрерывной накачкой. Как показали проведенные исследования лучевая прочность люминесцирующего экрана составила порядка 800 Вт/см². Использование таких широкоапертурных экранов-преобразователей в технологии лазерного упрочнения позволяет обеспечить наведение ИК-излучения на обрабатываемую поверхность, повысить производительность и структурное совершенство обрабатываемой рабочей поверхности.

Литература.

1. Реклама. Аппаратно-программные комплексы, приборы и устройства. Лазерные визуализаторы ИК-излучения. / <http://product.bsu.by/katalog/apparatno-programmnie-kompleksi-pribori-i-ustrojstva/elektronnie-komponenti-i-pribori/lazeri-i-optika/lazernie-vizualizatori-ik-izluchenija>.
2. Патент на полезную модель РБ 11035 Визуализатор инфракрасного лазерного излучения / Г. В. Шаронов. – Оpubл. 01.02.2016.
3. Патент на полезную модель РБ 11143. Визуализатор инфракрасного лазерного излучения / Н. И. Мухуров, И. В. Гасенкова, Г. В. Шаронов, Н. С. Казак. – Оpubл. 16.05.2016.

УДК 621.373.826

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ЛАЗЕРНЫЙ ДИОДНЫЙ МОДУЛЬ С КИЛОГЕРЦОВОЙ МГНОВЕННОЙ ШИРИНОЙ ЛИНИИ

Шестак В. В., Микитчук К. Б., Чиж А. Л.

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной работе представлен высококогерентный лазерный диодный модуль в малогабаритном металлическом корпусе и с низким электропотреблением. Мгновенная ширина линии генерации лазерного диодного модуля уменьшена до единиц килогерц за счет оптической самосинхронизации лазерным излучением в перекрестной поляризации. Характеристики модуля позволяют использовать его для широкого спектра применений от лидаров до волоконно-оптических сенсорных систем.

Ключевые слова: лазерный диодный модуль, ширина линии лазера, оптическая самосинхронизация, радиофотоника.

FIBER-OPTIC LASER DIODE MODULE WITH KILOHERTZ INSTANTANEOUS LINEWIDTH

Vladislav Shestak, Kiryl Mikitchuk, Alexander Chizh

SSPA «Optics, Optoelectronics and Laser Technology»
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. In this paper a high coherence laser diode module in a small-size metal package and with low power consumption is presented. The instantaneous laser linewidth of the module is decreased to kilohertz range due to self-injection locking by laser radiation in cross-polarization. The characteristics of the laser diode module allow it to be used for a wide range of applications from lidars to fiber-optic sensor systems.

Keywords: laser diode module, laser linewidth, optical self-injection locking, microwave photonics.

Адрес для переписки: Чиж А. Л., пр. Независимости, 68–1, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: chizh@oelt.basnet.by

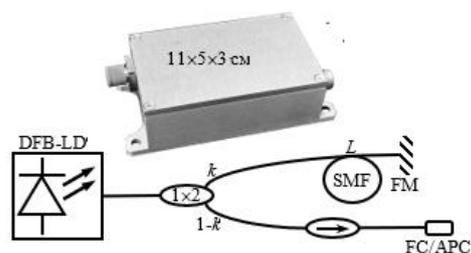
Введение. Развитие волоконно-оптических систем связи, лидарных систем, волоконно-оптических датчиков, а также спектроскопии высокого разрешения привело к необходимости создания малогабаритных лазерных источников с узкой линией генерации и низким уровнем шума [0, 0]. Ширина спектральной линии генерации лазерного источника является ключевым параметром при построении различных оптических систем, так как она влияет на уровень собственного шума, пространственное разрешение и чувствительность.

Для лазерных диодов с распределенной обратной связью, используемых в системах радиофотоники, типично ширина линии генерации превышает 100 кГц из-за малой длины оптического резонатора, поэтому уменьшение ширины линии генерации лазерных диодов является весьма актуальной задачей. Одним из методов по уменьшению ширины линии лазерного диода является оптическая самосинхронизация, которая достигается с помощью отражения малой доли излучения обратно в резонатор лазерного диода с задержкой на время, существенно большее, чем время жизни фотонов в лазерном резонаторе [0].

В данной работе представлен лазерный диодный модуль, мгновенная ширина линии генерации которого уменьшена до единиц килогерц за счет оптической самосинхронизации лазерным излучением в перекрестной поляризации.

Описание модуля. На рисунке 1 приведена фотография и блок-схема лазерного диодного мо-

дуля, в котором обеспечивается режим оптической самосинхронизации лазерного диода. В модуле небольшая доля k от 0,1 до 10 % излучения от термостабилизированного лазерного диода с распределенной обратной связью направляется с помощью волоконно-оптического разветвителя в отрезок одномодового оптического волокна длиной L с зеркалом Фарадея на конце, которое обеспечивает отражение исходного лазерного излучения в перекрестной поляризации.



1×2 – оптический разветвитель; SMF – отрезок оптического волокна; FM – зеркало Фарадея; FC/APC – выходной оптический разъем

Рисунок 1 – Фотография и блок-схема лазерного модуля, в котором используется режим оптической самосинхронизации лазерного диода с распределенной обратной связью (DFB-LD)

Главными параметрами, определяющими ширину линии лазерного диода в режиме оптической самосинхронизации, являются длительность задержки в петле оптической обратной связи

($\tau = 2n_f L / c$, где n_f – эффективный показатель преломления сердцевинки оптического волокна, c – скорость света) и коэффициент самоинжекции, который определяется отношением мощности лазерного излучения, инжектируемого в лазерный резонатор, к выходной мощности генерации лазерного диода ($\eta = \rho k^2$, где ρ – коэффициент отражения от зеркала Фарадея) [0, 0]. Для работы модуля необходимо двухполярное напряжение питания ± 6 В, при этом для обеспечения широкого рабочего температурного диапазона от -50 до $+50^\circ\text{C}$ максимальный ток потребления составляет 500 мА. Лазерный диодный модуль имеет выходной оптический разъем FC/APC и генерирует излучение на длине волны около 1550 нм с мощностью порядка 10 мВт.

Характеристики модуля. На рисунке 2 приведены контуры линий генерации лазерного диода в режиме оптической самосинхронизации для разных коэффициентов самоинжекции при длительности задержки 40 нс. Измерение ширины линии генерации лазерного диодного модуля проводилось с помощью метода гомодинирования на основе интерферометра Майкельсона. Увеличение коэффициента самоинжекции с -50 до -26 дБ приводит к уменьшению мгновенной ширины (лоренцевской составляющей) линии генерации лазерного диодного модуля до величины менее 10 кГц. Для дальнейшего сужения линии генерации необходимо увеличивать длительность задержки в петле оптической обратной связи.

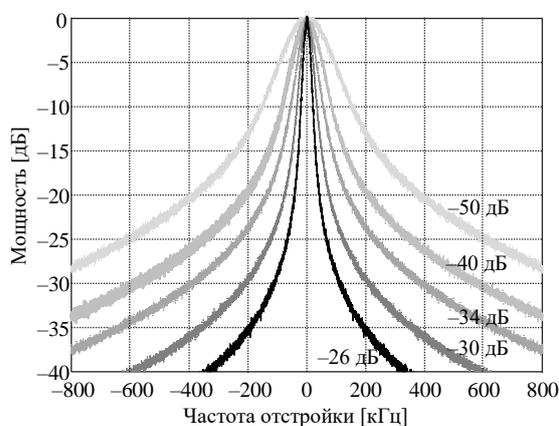


Рисунок 2 – Контурные линии генерации лазерного диода в режиме оптической самосинхронизации для разных коэффициентов самоинжекции от -50 до -26 дБ

При увеличении задержки до 80 нс мгновенная ширина линии лазерного диодного модуля уменьшилась до 5 кГц. На рисунке 3 приведена стабильность ширины лоренцевской составляющей линии генерации лазерного диода в режиме оптической самосинхронизации при коэффициенте самоинжекции -26 дБ и длительности задержки в петле оптической обратной связи 80 нс. Для исследования временной стабильности

временной ширины линии генерации через равные промежутки времени на протяжении более 10 часов проводилось свыше 10 000 измерений. Следует отметить, что при увеличении длительности задержки в петле оптической обратной связи гистограмма распределения ширины линии генерации становится несимметричной, но разброс значений ширины линии генерации уменьшается.

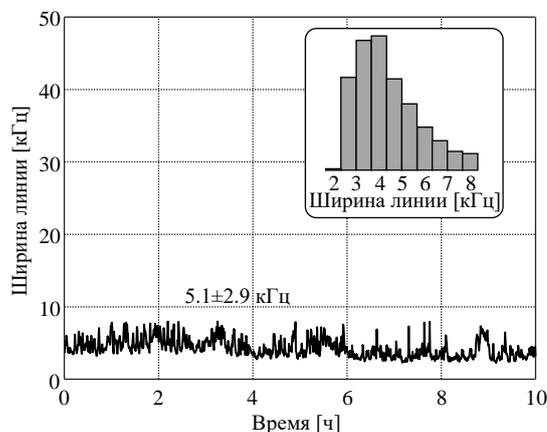


Рисунок 3 – Стабильность мгновенной ширины линии генерации лазерного диодного модуля для коэффициента самоинжекции -26 дБ и длительности задержки в петле обратной связи 80 нс. На вставке – гистограмма распределения величины ширины линии генерации

Заключение. В данной работе представлен высококогерентный лазерный диодный модуль в малогабаритном металлическом корпусе с размерами $11 \times 5 \times 3$ см и с низким электропотреблением менее 3 Вт, который обладает мгновенной шириной (лоренцевской составляющей) линии менее 10 кГц за счет использования режима оптической самосинхронизации лазерным излучением в перекрестной поляризации. Характеристики лазерного диодного модуля позволяют использовать его для широкого спектра применений от лидаров до волоконно-оптических сенсорных систем.

Литература

1. High-power sub-kHz linewidth lasers fully integrated on silicon / H. Duanni [et al.] // J. Optica. – 2019. – V. 6, № 6. – P. 745–752.
2. High-power, ultra-low noise hybrid lasers for microwave photonics and optical sensing / P. Morton [et al.] // J. Lightwave Technology. – 2018. – V. 36, № 21. – P. 5048–5057.
3. High-power, low RIN 1.55- μm directly modulated DFB lasers for analog signal transmission / M. Faugeron [et al.] // IEEE Photonics Technology Lett. – 2012. – V. 24, № 2. – P. 116–118.
4. Prasad, S. High-speed electronics and optoelectronics: devices and circuits / S. Prasad, H. Schumacher, A. Gopinath. – Cambridge University Press, 2009.
5. Coldren, L. Diode lasers and photonic integrated circuits / L. Coldren, S. Corzine, M. Mashanovitch. – John Wiley & Sons, 2012.

УДК: 681.7

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ КАНАЛОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Шилин А. А., Журавлев И. С., Киль И. А.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация

Аннотация. Целью данного исследования является оценить целесообразность применения различных типов тепловизионных каналов в составе беспилотных летательных аппаратов в зависимости от их дальности действия.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, тепловизионные каналы.

ASSESSMENT OF THE APPLICABILITY OF THERMAL IMAGING CHANNELS OF VARIOUS TYPES FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

Shilin A., Zhuravlev I., Kil I.

Tula State University
Tula, Russian Federation

Abstract. The purpose of this study is to assess the feasibility of using various types of thermal imaging channels as part of unmanned aerial vehicles depending on their recognition range.

Key words: thermal imager, UAV, recognition distance.

Адрес для переписки: Журавлев И. С., пр. Ленина, 92, г. Тула 300600, Российская Федерация
e-mail: info@tsu.tula.ru

В настоящее время беспилотники активно применяются в различных отраслях промышленности.

Актуальность применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) обусловлена несколькими ключевыми факторами:

- снижение рисков для попадания в труднодоступные места;
- непрерывное наблюдение;
- гибкость и мобильность применения.

Для обеспечения непрерывного наблюдения и сбора информации БЛА оснащены системами технического зрения, которые обеспечивают наблюдение в различных спектральных диапазонах.

Для обеспечения круглосуточной работы широко применяются тепловизионные приборы наблюдения.

Проблемой всех оптических приборов является то, что при увеличении фокусного расстояния и дальности распознавания увеличивается масса прибора и его габариты, которые ограничены полезной нагрузкой БЛА.

Целью данного исследования является оценить целесообразность применения различных типов тепловизионных каналов в привязке к их дальности действия и массе.

Тепловизионные каналы бывают двух видов: с охлаждаемым приемником излучения и неохлаждаемым.

Для составления статистики был проведен анализ 26 приемников излучения и 80 объективов различных производителей, по итогам которого можно сделать вывод, что наличие микрокриогенной машины увеличивает массу и габариты охлаждаемых приемников, однако они имеют лучшую

энергетическую чувствительность. Неохлаждаемые приемники имеют меньшую массу, однако требуют обеспечение высокой светосилы объектива для компенсации проблем с чувствительностью самого приемника.

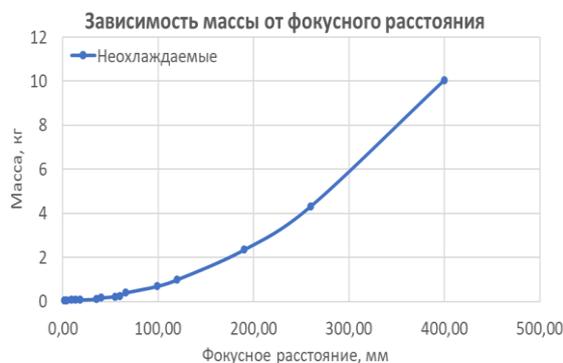


Рисунок 1 – Зависимость массы от фокусного расстояния у неохлаждаемых тепловизионных каналов



Рисунок 2 – Зависимость массы от фокусного расстояния у охлаждаемых тепловизионных каналов

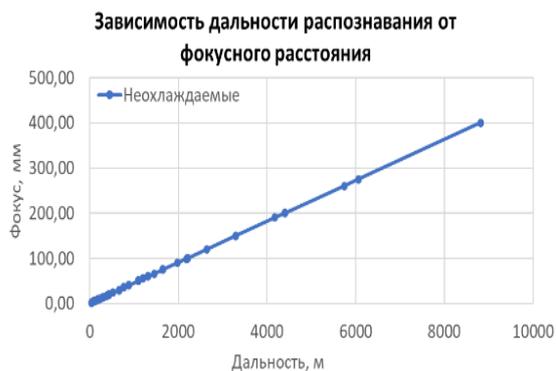


Рисунок 3 – Зависимость дальности распознавания от фокусного расстояния у неохлаждаемых тепловизионных каналов

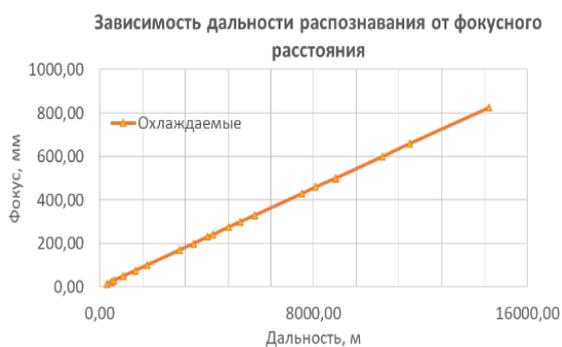


Рисунок 4 – Зависимость дальности распознавания от фокусного расстояния у охлаждаемых тепловизионных каналов

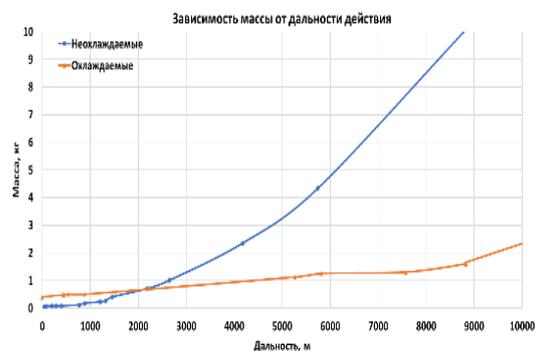


Рисунок 5 – Зависимость массы от дальности действия у тепловизионных каналов

По данным, полученным в результате анализа, были составлены графики зависимости массы от фокусного расстояния, и получены дальности распознавания для этих значений. Последнее сделано для объекта – легковой автомобиль по модифицированному критерию Джонсона при величине вероятности 80 % (рисунки 1–4). Размер чувствительного элемента охлаждаемого приемника взят равным 15 мкм, неохлаждаемого – равным 12 мкм.

Имея общую ось фокусного расстояния, можно объединить два этих графика и построить зависимость массы от дальности действия для двух типов тепловизионных каналов.

По полученным результатам видно, что по дальности распознавания до расстояния 2 км неохлаждаемые тепловизоры выигрывают по массе. Если же распознать объект необходимо на большем расстоянии, то применение неохлаждаемых тепловизионных каналов приведет к существенному повышению массы прибора.

Ограничениями данного результата являются:

- допущение, что объектив для неохлаждаемого приемника излучения имеет диафрагменное число не менее 1,2;
- нет учета температурного контраста объект-фон, т. е. проводился геометрический расчет дальности распознавания;
- используются только данные готовых объективов.

Стоит отметить, что планируются дальнейшие исследования, которые будут направлены на уточнение и устранение озвученных ограничений, а также на расширения подхода на другие значимые для применения на беспилотниках параметры, например – такие как длина и диаметр тепловизионного канала, его стоимость и пр.

Литература

1. Якушенко, Ю. Г. Современные проблемы инфракрасной техники / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенко. – М.: Изд. МИИГА и К, 2011. – 84 с.
2. Holst, G. C. Electro-optical imaging system performance / G. C. Holst. – JCD Publishing Winter Park, Florida USA, 2000. – 437 с.
3. Грузевич, Ю. К. Оптико-электронные приборы ночного видения / Ю. К. Грузевич. – ФИЗМАТ-ЛИТ, 2014. – 276 с.

УДК 535.327, 535.012

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ МОНОКЛИННЫХ КРИСТАЛЛОВ $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$ Юмашев К. В.¹, Гурецкий С. А.², Карпинский Д. В.², Труханова Е. Л.², Герцова А. В.¹¹Белорусский национальный технический университет²ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Получены зависимости температурных коэффициентов показателей преломления для поляризаций света вдоль осей N_p , N_m и N_g оптической индикатрисы от коэффициента стехиометрии x моноклинных кристаллов $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$.

Ключевые слова: моноклинные кристаллы, температурные коэффициенты показателей преломления, метода отклонения лазерного пучка.

THERMO-OPTIC COEFFICIENTS OF MONOCLINIC $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$ Yumashev K.¹, Guretskii S.², Karpinsky D.², Trukhanova E.², Hertsova A.¹¹Belarusian National Technical University²SSPA “Scientific Practical Materials Research Center of NAS of Belarus”

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The dependences of the thermo-optic coefficients for light polarizations along the N_p , N_m , and N_g axes of the optical indicatrix on the stoichiometry coefficient x of monoclinic $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$ crystals were obtained.

Key words: monoclinic crystals, thermo-optic coefficients, laser beam deviation technique.

Адрес для переписки: Юмашев К. В., пр. Независимости, 65/17, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: kyumashev@bntu.by

В настоящей работе исследованы температурные коэффициенты показателя преломления dn/dT моноклинных кристаллов калий-иттриевых вольфраматов, активированных ионами иттербия $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$. Данные кристаллы являются высокоэффективными лазерными активными средами, генерирующими в спектральной области 1 мкм. Радиусы ионов иттрия Y^{3+} и иттербия Yb^{3+} близки (1,019 Å и 0,985 Å соответственно), что дает возможность непрерывного легирования кристалла $KY(WO_4)_2$ (коэффициент стехиометрии $x = 0$) ионами Yb^{3+} , в конечном итоге получая кристалл $KYb(WO_4)_2$ ($x = 1,0$).

Кристаллы $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$ выращивались модифицированным методом Чохральского, детально описанным в [1]. Температурные коэффициенты dn/dT определялись с помощью метода отклонения лазерного пучка в среде с линейным градиентом температуры. Этот метод основан на измерении угла отклонения θ лазерного луча, прошедшего через образец в форме прямоугольного параллелепипеда, в котором создан линейный градиент температуры. По полученным значениям угла θ находится термический коэффициент оптического пути W . Величина W в данном эксперименте определяется формулой $W = dn/dT + \alpha(n - 1)$, где α – температурный коэффициент линейного расширения материала в направлении распространения света, а n – его показатель преломления для соответствующей длины волны света λ и поляризации E лазерного пучка. Поэтому в итоге температурный коэффициент dn/dT определяется по формуле $dn/dT = W - \alpha(n - 1)$, в

которой используются известные данные по коэффициенту α и показателю n . Погрешности в измерении W и dn/dT составили $\sim 0,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ и $\sim 0,6 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ соответственно. Детальное описание данного метода и процедуры измерения можно найти в [2, 3].

Моноклинные кристаллы $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$ относятся к пространственной группе симметрии $C2/c$ и являются двуосными средами. В соответствии с этим оптические свойства этих кристаллов описываются оптической индикатрисой с тремя ортогональными главными осями N_p , N_m и N_g . При этом между главными показателями преломления n_p , n_m и n_g (для поляризаций света $E//N_p$, $E//N_m$ и $E//N_g$ соответственно) выполняется условие $n_p < n_m < n_g$. Ось N_p параллельна кристаллографической оси b , а оси N_m и N_g лежат в плоскости кристаллографических осей a и c . Поэтому для измерений коэффициентов dn_i/dT ($i = p, m, g$) были приготовлены по три образца для каждого стехиометрического состава $x = 0, 0,05, 0,1, 0,2, 0,5$ и $1,0$. Образцы имели форму прямоугольных параллелепипедов с размерами $5,6 \times 7,0 \times 8,6$ мм³ ($x = 0$), $8,0 \times 7,0 \times 8,5$ мм³ ($x = 0,05$), $8,0 \times 7,0 \times 8,6$ мм³ ($x = 0,1$), $8,0 \times 7,0 \times 8,5$ мм³ ($x = 0,2$), $8,0 \times 7,0 \times 9,1$ мм³ ($x = 0,5$) и $8,1 \times 7,0 \times 9,1$ мм³ ($x = 1,0$), ориентированными вдоль осей N_p , N_m и N_g соответственно [рис. 2 (б)]. Ориентация образцов достигалась путем идентификации оси b кристалла с помощью рентгеновского просвечивания образцов в геометрии обратного рассеяния Лауэ с точностью $0,2^\circ$. Далее приготавливались образцы с гранями, перпендикулярными направлению $b//N_p$, и определялось

направление осей N_m и N_g путем выявления направлений гашения света (с точностью $0,5^\circ$) при просмотре образцов, помещенных между скрещенными поляризаторами, вдоль оси b . Содержание иттербия в выращенных кристаллах измеряли методом рентгеновской флуоресценции с использованием эталонных образцов. Относительный разброс концентрации иттербия в объеме исследуемых кристаллов в зависимости от уровня легирования составлял $0,3-0,7\%$. Измерения проводились на длине волны $1,06$ мкм.

В таблице 1 приведены значения термического коэффициента оптического пути W измеренные для различных направлений распространения k и поляризации E света. Значения W характеризуются сильной анизотропией, отличаясь как по абсолютной величине, так и по знаку для различных сочетаний направлений k и E . При этом для фиксированных направлений k и E термический коэффициент оптического пути возрастает с увеличением коэффициента стехиометрии x кристалла.

Таблица 1 – Термические коэффициенты оптического пути ($10^{-6} K^{-1}$) для кристаллов $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$, измеренные на длине волны $1,06$ мкм при различных направлениях распространения k и поляризации E света

Коэффициент стехиометрии, x	$k // N_p$		$k // N_m$		$k // N_g$	
	$E // N_m$	$E // N_g$	$E // N_p$	$E // N_g$	$E // N_p$	$E // N_m$
0	-6,2	-10,2	-4,8	-1,2	0,58	6,2
0,05	-6,0	-10,1	-4,6	-1,0	0,64	6,5
0,1	-5,3	-9,9	-4,1	-0,97	0,69	6,9
0,2	-5,2	-9,7	-3,6	-0,43	1,1	7,5
0,5	-4,1	-8,9	-3,4	0,48	1,3	8,0
1,0	-2,0	-7,5	-1,8	2,7	2,4	9,7

Таблица 2 – Температурные коэффициенты показателей преломления dn/dT ($10^{-6} K^{-1}$) для кристаллов $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$, измеренные на длине волны $1,06$ мкм при различных направлениях распространения k и поляризации E света, x – коэффициент стехиометрии

x	dn/dT ($10^{-6} K^{-1}$)						значения, усредненные по направлению k		
	$E // N_p$		$E // N_m$		$E // N_g$		$E // N_p$	$E // N_m$	$E // N_g$
	$k // N_m$	$k // N_g$	$k // N_p$	$k // N_g$	$k // N_p$	$k // N_m$			
0	-16,0	-15,4	-9,6	-10,4	-13,8	-13,4	-15,7	-10,0	-13,6
0,05	-15,9	-15,3	-9,45	-10,1	-13,7	-13,3	-15,6	-9,8	-13,5
0,1	-15,4	-15,2	-8,8	-9,6	-13,5	-13,3	-15,3	-9,2	-13,4
0,2	-14,9	-14,7	-8,7	-8,9	-13,3	-12,9	-14,8	-8,8	-13,1
0,5	-14,8	-14,2	-7,6	-8,2	-12,6	-12,4	-14,5	-7,9	-12,5
1,0	-13,3	-12,7	-5,6	-6,0	-11,3	-10,9	-13,0	-5,8	-11,1

На рисунок 1 показана зависимость термических коэффициентов оптического пути от коэффициента стехиометрии x для различных направлений распространения k и поляризации E света. Зависимость W от x достаточно хорошо описывается линейной зависимостью для каждой пары направлений k и E .

Температурные коэффициенты показателей преломления для поляризаций света $E // N_p$, $E // N_m$ и $E // N_g$ определялись по формуле

$$\frac{dn_i}{dT} = W_{ij} - \alpha_j(n_i - 1),$$

где ($i \neq j$), индекс $i = p, m, g$ соответствует поляризации света, а индекс $j = p, m, g$ – направлению распространения света k . При этом использовались полученные ранее для кристаллов $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$ значения температурных коэффициентов линейного расширения по наклону линейной зависимости, описывающей теплового расширения материала:

$$\alpha_p = (3.42 + 0.08x) 10^{-6} K^{-1},$$

$$\alpha_m = (11.60 + 1.00x) 10^{-6} K^{-1},$$

$$\alpha_g = (16.49 - 1.30x) 10^{-6} K^{-1} [1].$$

Значения показателей преломления для различных коэффициентов стехиометрии x находились по формуле $n = xn_{KYbW} + (1-x)n_{KYW}$ [4], в которой n_{KYbW} и n_{KYW} – показатели преломления соответственно для кристаллов $KYbW$ ($x = 1.0$) и KYW ($x = 0$): на длине волны $1,06$ мкм $n_p = 1,9925$, $n_m = 2,0357$, $n_g = 2,0773$ (для $KYbW$), $n_p = 1,9681$, $n_m = 2,0063$, $n_g = 2,0499$ (для KYW) [5, 6].

В таблице 2 приведены значения температурных коэффициентов показателей преломления dn_i/dT для кристаллов $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$, полученные при различных направлениях распространения k и поляризации E света, а также значения dn_i/dT , усредненные для каждой поляризации света по двум направлениям распространения k . Температурные коэффициенты dn_i/dT для всех поляризаций света и коэффициентов стехиометрии x отрицательные и характеризуются достаточно сильной анизотропией. При этом для каждой поляризации света значение температурного коэффициента x (то есть при последовательном переходе от кристалла KYW к $KYbW$) уменьшается по абсолютной величине с увеличением коэффициента стехиометрии.

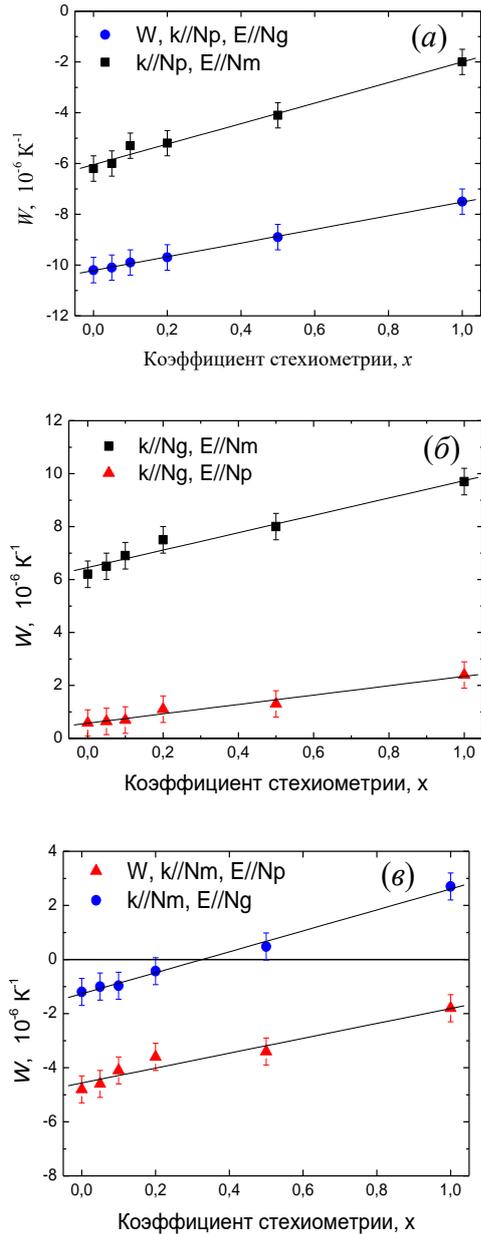


Рисунок 1 – Зависимость термических коэффициентов оптического пути W кристаллов $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$ на длине волны 1,06 мкм от коэффициента стехиометрии x для различных направлений распространения k и поляризаций E света. Символы – экспериментальные данные, линии – линейная аппроксимация (коэффициенты R^2 составляют 0,9427 – 0,9991)

На рисунок 2 приведена зависимость температурных коэффициентов dn_i/dT , усредненных по двум направлениям распространения света k , от коэффициента стехиометрии x кристаллов $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$. Данные усредненные значения рассматриваются в качестве итоговых температурных коэффициентов показателей преломления для каждой поляризации света. Зависимость dn_i/dT от x достаточно хорошо описывается линейной зависимостью для каждой поляризации света:

$$\frac{dn_p}{dT} = (-15.613 + 2.583x) 10^{-6} K^{-1},$$

$$\frac{dn_m}{dT} = (-9.830 + 4.042x) 10^{-6} K^{-1},$$

$$\frac{dn_g}{dT} = (-13.633 + 2.484x) 10^{-6} K^{-1}.$$

Различие между значениями dn/dT при $x = 0$ и $x = 1,0$ составляет $(2,5-4,2) \cdot 10^{-6} K^{-1}$, что значительно превышает погрешность измерения dn/dT ($0,6 \times 10^{-6} K^{-1}$). Таким образом, зависимость температурных коэффициентов показателей преломления от коэффициента стехиометрии x кристаллов $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$ можно представить в виде:

$$\left(\frac{dn_{p,m,g}}{dT}\right)_{KYb_xY_{1-x}W} = x \left(\frac{dn_{p,m,g}}{dT}\right)_{KYbW} + (1-x) \left(\frac{dn_{p,m,g}}{dT}\right)_{KYNp}.$$

Следует отметить, что данные по dn/dT , полученные в настоящей работе для KYW и $KYbW$ находятся в хорошем согласии с соответствующими значениями, полученными другими авторами и которые собраны в [7].

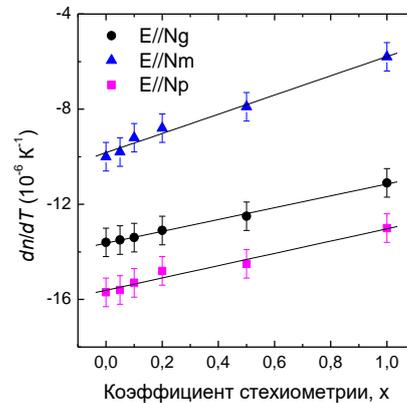


Рисунок 2 – Зависимость температурных коэффициентов показателей преломления dn/dT (усредненных по измерениям для двух направлений распространения света) кристаллов $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$ на длине волны 1,06 мкм от коэффициента стехиометрии x . Символы – экспериментальные данные, линии – линейная аппроксимация (коэффициенты детерминации $R^2 = 0,9855$ ($E // N_p$), $0,9931$ ($E // N_m$) и $0,9981$ ($E // N_g$))

Литература

1. Appl. Phys. B / K. V. Yumashev [et al.]. – 2024. – V. 130 (1), art. 14.
2. Appl. Phys. B / S. Vatik [et al.]. – 2009. – V. 95 (4). – P. 653–656.
3. Приборы и методы измерений / П. А. Лойко. – 2010. – № 1. – С. 70–77.
4. Opt. Letters / S. Kurilchik [et al.]. – 2017. – V. 42 (21). – P. 4565–4568.
5. Physical review B / M. C. Pujol [et al.]. – V. 65. – P. 165121-1–165121-11.
6. Crystals, Crystallogr. Rep. / A. A. Kaminskii [et al.]. – 2001. – V. 46 (4). – P 733–741.
7. Opt. Mater / P. A. Loiko [et al.]. – 2011. – V. 33, № 11. – 1688–1694.

УДК 531.383:681.787

ПОДБОР КОМПОНЕНТОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТРЕХОСЕВОГО МИКРООПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Якубович Т. С., Фёдорцев Р. В., Луговик А. Ю., Конопляников А. А.

Белорусский национальный технический университет, ООО «НавиИС»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Предложен оптимальный набор компонентов для трехосевого микрооптического гироскопа, а также приведено моделирование структурно-функциональной схемы волоконно-оптического гироскопа.
Ключевые слова: гироскоп, эффект Саньяка, микрооптический, оптическое волокно.

SELECTION OF COMPONENTS AND MODELING OF OPERATION OF A THREE-AXIS MICRO-OPTICAL GYROSCOPE

Yakubovich T., Fiodartsau R., Lugovik A., Kanaplianikau A.

Belarusian National Technical University, LLC «NaviIS»
Minsk, Republic of Belarus

Annotation. An optimal set of components for a three-axis micro-optical gyroscope is proposed, and a modeling of the structural and functional diagram of a fiber-optic gyroscope is presented.

Key words: gyroscope, Sagnac effect, micro-optical, optical fiber.

Адрес для переписки: Якубович Т. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: tanya.yakubovich.03@bk.ru

Волоконный оптический гироскоп (ВОГ) – оптико-электронный прибор, осуществляющий измерение угловой скорости и углов поворота объекта, на котором он установлен. Принцип действия ВОГ основан на вихревом (вращательном) эффекте Саньяка [1]. Создание компактного устройства стало возможным лишь с развитием и совершенствованием элементной базы квантовой электроники. Микрооптические гироскопы на мировом рынке являются новым продуктом и в основном представлены компанией ANELLO Photonics (US). Наиболее известное техническое решение кремниевый фотонно-оптический гироскоп SiPhOG™ (рисунок 1) с габаритными размерами до 30 мм. Дрейф SiPhOG первого поколения составляет менее 0,5 °/час.



Рисунок 1 – Внешний вид гироскопа SiPhOG™

На рисунке 2 [2] показана структурная схема ВОГ, для которой осуществляем подбор компонентов. Основными элементами ВОГ являются: оптическое волокно; источник излучения; разветвитель; фотоприемник; блок обработки сигналов; разветвитель и фазовый модулятор в виде многофункциональной интегрально-оптической схемы (МИОС).

При выборе между двумя типами волокон: многомодовым и одномодовым, предпочтительным вариантом является одномодовое волокно типа

PANDA из кварцевого стекла, с диаметрами оболочки 125 мкм и сердцевины 8 мкм. На рабочей длине волны 1550 нм данное волокно обладает малыми внутренними потерями на рассеивание – затухание сигнала на уровне 0,4 дБ/км. Используемый тип волокна должен сохранять исходную поляризацию, т.к. для получения интерференции требуется высокий контраст ответных двух волн с правого и левого направления обхода.

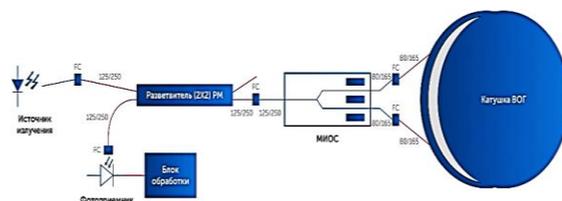


Рисунок 2 – Структурная схема ВОГ

При конструировании волоконных оптических гироскопов, как правило, в качестве излучателей используют полупроводниковые лазеры, светодиоды и суперлюминесцентные диоды. Подобран источник излучения в соответствии с рабочей длиной волны. Из рисунка 3 видно, что типовое значение длины волны это 1550 нм.

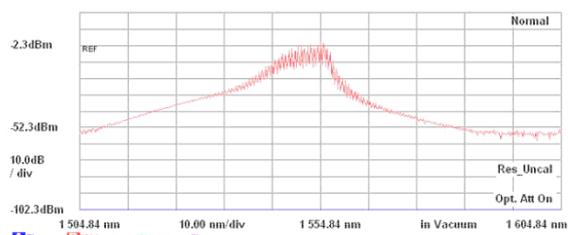


Рисунок 3 – Спектральная характеристика источника излучения серии PL-UWB-SLD-1550-A-A81-2-SA

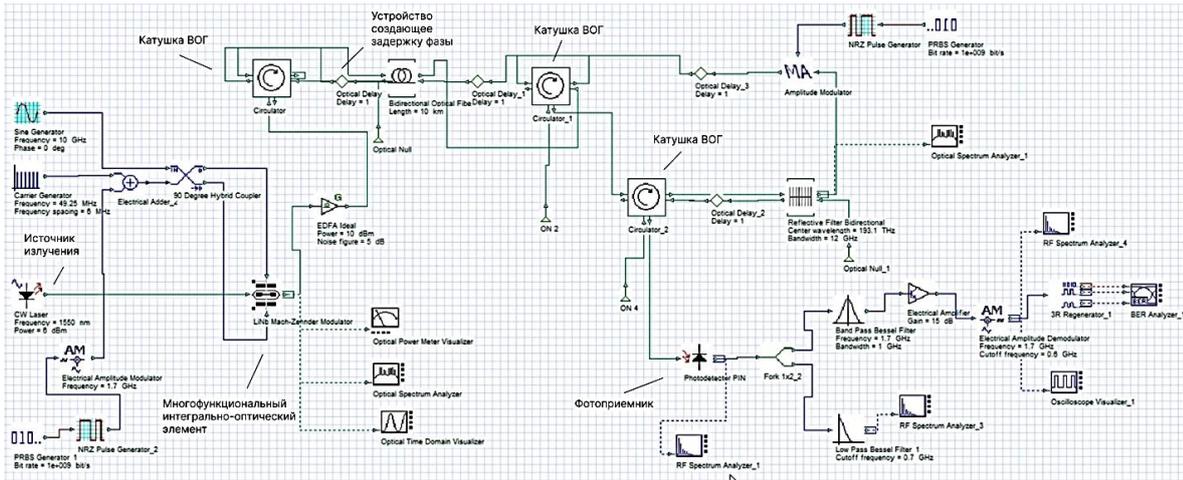


Рисунок 5 – Имитационная модель ВОГ в программном пакете OPTISYSTEM

Фотодетектор волоконного оптического гироскопа преобразует оптическую интерференционную картину на входе в выходной электрический сигнал. Фотоприемник, его рабочий диапазон 900–1700 нм. Диапазон чувствительности при длине волны 1550 нм на графике составляет 90 % (рисунок 4).

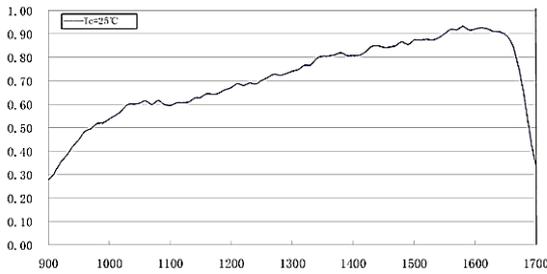


Рисунок 4 – Диапазон чувствительности фотодиода серии PL-1700-IG-AR0075-TO

В качестве разветвителя (сплиттера) используется планарный (PLC) оптический делитель X типа – 2×2 модель M200R5S2B Thorlabs (ОВ Ø200 мкм). Многофункциональный интегрально-оптический элемент изготавливается на подложке из ниобата лития. Данный материал обеспечивает высокую линейность и низкий уровень шумов по сравнению с кремниевыми подложками.

Выходной сигнал [3] гироскопа в общем виде можно представить следующим образом:

$$U_{out} = k(T) * \omega + U_d(T) + N(T)$$

где U_{out} – выходное напряжение гироскопа, В; $U_d(T)$ – дрейф нулевого значения выходного сигнала, В; $k(T)$ – масштабный коэффициент гироскопа, В/град/с; ω – измеряемая угловая скорость, град/с; $N(T)$ – шум гироскопа, В.

Моделирование структурно-функциональной схемы волоконно-оптического гироскопа проводится с использованием программных средств OPTISYSTEM. На базе приведенного алгоритма была разработана имитационная модель ВОГ,

представленная на рисунке 5. Исходные параметры: установившаяся угловая скорость движения объекта 40 град/с; температура $T = 48^\circ\text{C}$.

Анализ полученного в соответствии с приведенными выражениями графика распределения шумового сигнала гироскопа при правом обходе (рисунок 6, а) и при левом обходе (рисунок 6, б) показывает соответствие с нормальным законом распределения, который подтверждается критерием согласия Пирсона. Разность времен обхода для встречных пучков, равна

$$\Delta t = \frac{4\pi R^2}{c^2} \Omega = 6,6 \text{ мкс.}$$

Из разности времен обхода получаем разность оптических длин путей распространения света в противоположных направлениях:

$$\Delta L = c\Delta t = 1,98 \text{ мм.}$$

Полученные результаты моделирования согласуются с данными экспериментальных исследований, проведенных в Институте электронных и информационных систем Новгородского ГУ для промышленного образца волоконно-оптического гироскопа модели VG910Q в программной среде Simulink [3].

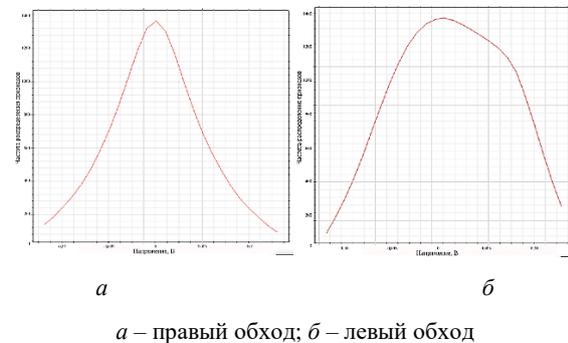


Рисунок 6 – Аппроксимация распределения шумового сигнала нормальным законом при правом и левом обходе

Литература

1. Филатов Ю. В. Оптические гироскопы. –СПб: ГЭТУ ЛЭТИ, 2005. – 139 с.
2. Оборудование и компоненты для производства волоконнооптических гироскопов [Электронный ре-

сурс]. – Режим доступа: <https://sphotronics.ru/solutions/vog-sboraka-i-proizvodstvo-komponentov/>.

3. Разработка модели волоконно-оптического гироскопа в среде Simulink [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://razrabotka-modeli-volokonno-opticheskogo-giroskopa-v-srede-simulink.pdf>.

УДК 535.37

**МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ ОТ ИОНОВ ИТТЕРБИЯ К ИОНАМ ТУЛИЯ
ВО ФТОРФОСФАТНЫХ СТЕКЛАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ВОЗБУЖДЕНИЯ
ИОНОВ ИТТЕРБИЯ**

Ясюкевич А. С.¹, Колобкова Е. В.², Кисель В. Э.¹

¹НИИЦ ОМТ, Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

²Университет ИТМО

Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Изучены спектроскопические характеристики фтор-фосфатных стекол с малым содержанием фосфатов, соактивированных ионами Yb³⁺ и Tm³⁺, проанализированы механизмы переноса энергии между ионами иттербия и тулия в зависимости от концентрации ионов Yb³⁺ в стационарном и импульсном режимах возбуждения люминесценции.

Ключевые слова: ионы тулия, ионы иттербия, перенос энергии, ап-конверсионная люминесценция.

**MECHANISMS OF ENERGY TRANSFER FROM YTTERBIUM IONS TO THULIUM IONS
IN FLUOROPHOSPHATE GLASSES UNDER VARIOUS REGIMES OF YTTERBIUM ION
EXCITATION**

Yasukevich A.¹, Kolobkova E.², Kisel V.¹,

¹Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

²ITMO University, Saint-Petersburg

Russian Federation

Abstract. Spectroscopic characteristics of fluorophosphate glasses with a low content of phosphates co-doped with Yb³⁺ and Tm³⁺ ions were studied, and energy transfer mechanisms between ytterbium and thulium ions were analyzed depending on the concentration of Yb³⁺ ions in stationary and pulsed luminescence excitation regimes.

Key words: thulium ions, ytterbium ions, energy transfer, up-conversion luminescence.

Адрес для переписки: Ясюкевич А. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: anatol@bntu.by

Стекла и кристаллы, активированные ионами редкоземельных элементов, излучающие в видимой и ультрафиолетовой (УФ) областях спектра при возбуждении излучением в инфракрасной области (ИК) спектра привлекают к себе большое внимание в связи с их применением в твердотельных лазерах, медицине и термометрии.

В материалах со-активированных ионами иттербия (Yb³⁺) и тулия (Tm³⁺), ионы Yb³⁺ служат донорами, обеспечивающими эффективный перенос энергии к ионам Tm³⁺, в результате которого наблюдается ап-конверсионная люминесценция в УФ и видимой областях спектра.

Данная работа является продолжением работы [1], где была исследована ап-конверсионная люминесценция фтор-фосфатных стекол с низким содержанием фосфатов, активированных ионами Yb³⁺ и Tm³⁺. Концентрация ионов Yb³⁺ была постоянной, 10²¹ см⁻³, а концентрация ионов Tm³⁺ изменялась в пределах 10²⁰ см⁻³ – 10¹⁵ см⁻³.

В [1] было показано, что при стационарном возбуждении ионов Yb³⁺ в стеклах с содержанием TmF₃ 2.0–0,25 мол. % превалирует последовательный механизм переноса энергии (sequential energy transfer, SET) от ионов Yb³⁺, находящихся на уровне ²F_{5/2}, к ионам Tm³⁺, приводящий к заселению уровня ¹G₄, переходы с которого ¹G₄→³H₆ и ¹G₄→³F₄, обуславливают люминесценцию на 477 нм и 650 нм, соответственно. При уменьшении содержания TmF₃ < 0,1 мол. %, заселение уровня ¹G₄ происходит в основном вследствие кооперативного переноса энергии (cooperative energy transfer, CET) от кластеров, Yb-Yb, где оба иона находятся в возбужденном состоянии. Люминесценция ионов Tm³⁺ на 800 нм связывается с переходами ³H₄→³H₆, процесс заселения уровня ³H₄ обусловлен последовательным переносом энергии.

В данной работе сообщаются результаты исследования ап-конверсионной люминесценции в стеклах аналогичного состава как и в [1], с тем

отличаем, что здесь концентрация ионов Tm^{3+} остается постоянной, $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, а концентрация ионов Yb^{3+} изменяется в пределах $4,1 \cdot 10^{20} - 22,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Основное внимание здесь уделяется изучению механизмов возбуждения и дезактивации уровней энергии ионов Yb^{3+} и Tm^{3+} при различных режимах возбуждения.

Для изучения особенностей возбуждения ап-конверсионной люминесценции в исследуемых стеклах мы ограничились наиболее интенсивными линиями в спектре ап-конверсионной люминесценции ионов Tm^{3+} на 475 нм ($^1G_4 \rightarrow ^3H_6$), 650 нм ($^1G_4 \rightarrow ^3F_4$) и 800 нм ($^1G_4 \rightarrow ^3H_5$, $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$). Были исследованы зависимости мощности ап-конверсионной люминесценции P_{lum} ионов Tm^{3+} от стационарной мощности возбуждающего излучения P_{pump} ионов Yb^{3+} в двойной логарифмической шкале.

Типичный вид ап-конверсионных спектров люминесценции и зависимостей для различных длин волн ап-конверсионной люминесценции $\ln(P_{lum}) = n \ln(P_{pump}) + \text{const}$ представлен на рисунке 1 для стекла с содержанием YbF_3 10,6 мол. %. Здесь параметр n определяет число фотонов необходимых для заселения уровней энергии ионов Tm^{3+} при переносе энергии возбуждения от Yb^{3+} к Tm^{3+} .

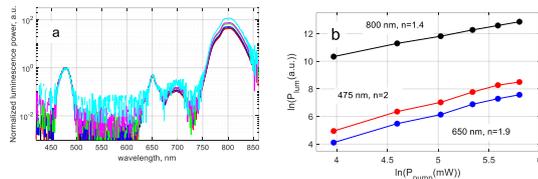


Рисунок 1 – Спектр ап-конверсионной люминесценции (a) ионов Tm^{3+} и зависимости мощности люминесценции от мощности излучения возбуждения (b)

В таблице 1 представлены значения параметра n для исследуемых стекол.

Таблица 1 – Значения параметра n для стекол с различной концентрацией Yb^{3+}

$N_{Yb}, \text{ см}^{-3}$	$YbF_3, \text{ мол. \%}$	800 нм, n	650 нм, n	477 нм, n
$8,2 \cdot 10^{20}$	4	1,8	2,5	2,5
$10,2 \cdot 10^{20}$	5	1,7	2,4	2,5
$17,0 \cdot 10^{20}$	8	1,7	2,3	2,4
$18,2 \cdot 10^{20}$	9	1,7	2,2	2,3
$22,5 \cdot 10^{20}$	11	1,4	1,9	2

Как видно из таблицы 1, с увеличением концентрации ионов Yb^{3+} изменяется характер заселения уровня 1G_4 , который является начальным при переходах, обуславливающих люминесценцию на 475 нм и 650 нм. При малых концентрациях преобладает перенос энергии возбуждения по схеме SET, в который вовлечены три фотона, $n \approx 3$. При возрастании концентрации ионов Yb^{3+} преобладающим становится перенос энергии возбуждения

по схеме CET, $n \approx 2$. Схемы SET и CET при переносе энергии показаны на рисунке 2.

Для возбуждения люминесценции на 800 нм требуется ≈ 2 фотона, следует, однако, учитывать, что в эту линию дает вклад как переход $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$ (800 нм), так и переход $^1G_4 \rightarrow ^3H_5$ (785 нм).

Были зарегистрированы также кинетики люминесценции ионов Yb^{3+} и Tm^{3+} при возбуждении стекол световыми импульсами длительностью ≈ 20 нс в линию поглощения ионов Yb^{3+} , ≈ 975 нм. Кинетики люминесценции ионов Tm^{3+} в видимой и ИК областях спектра имеют как участки разгорания так и затухания люминесценции.

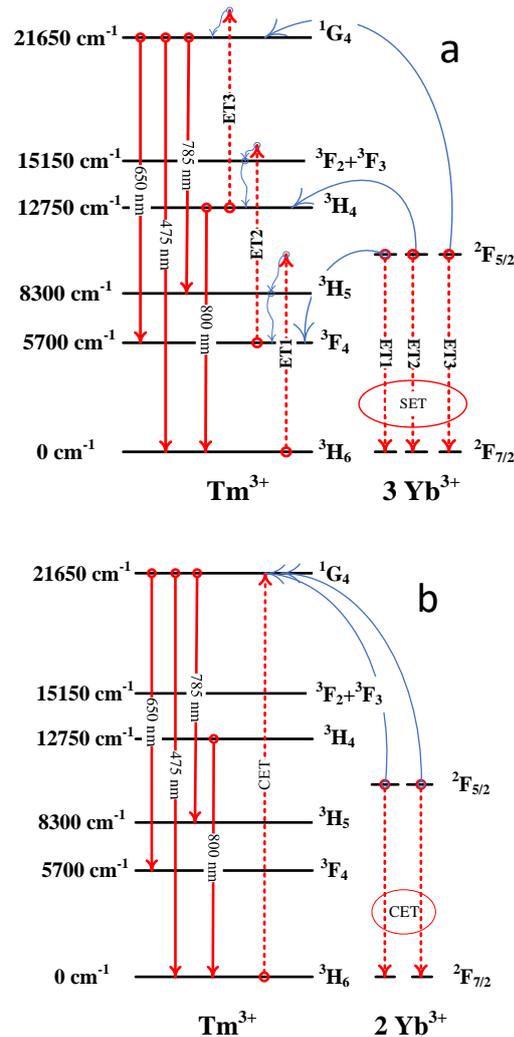


Рисунок 2 – Схема последовательного, SET (a) [2] и кооперативного, CET (b) [3] переноса энергии. Штриховые стрелки – безызлучательные переходы, участвующие в переносе энергии, волнистые стрелки – релаксация с участием фононов, сплошные стрелки – переходы, обуславливающие ап-конверсионную люминесценцию

На рисунке 3 представлены кинетики ап-конверсионной люминесценции ионов Tm^{3+} для стекол с содержанием YbF_3 11 мол. % и 4 мол. % в

сопоставлении с кинетиками люминесценции ионов Yb^{3+} в этих стеклах.

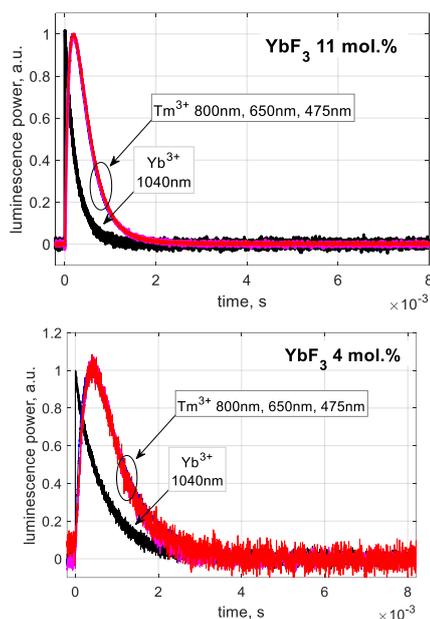


Рисунок 3 – Кинетики люминесценции ионов Tm^{3+} на длинах волн: 475 нм, 650 нм и 800 нм в сравнении с кинетиками затухания люминесценции ионов Yb^{3+} на 1040 нм

Обращает на себя внимание тот факт, что кинетики люминесценции ионов Tm^{3+} на длинах волн 475 нм, 650 нм и 800 нм практически совпадают друг с другом по форме.

Как обсуждалось для случая стационарного возбуждения ап-конверсионной люминесценции, переходы, обуславливающие люминесценцию на 475 нм и 650 нм имеют один и тот же начальный уровень – $^1\text{G}_4$, а в люминесценцию на 800 нм вносят вклад переходы с начальными уровнями $^1\text{G}_4$ и $^3\text{H}_4$. Одинаковая форма кинетик при возбуждении люминесценции коротким импульсом может свидетельствовать о том, что в данном случае вклад перехода $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$ в люминесценцию на 800 нм незначителен и режим заселения уровня $^1\text{G}_4$ связан в основном с СЕТ, см. рисунок 2, *b*.

Литература

1. Kolobkova, E. Upconversion luminescence and energy transfer in the fluorophosphate glasses with low phosphate content doped with Tm^{3+} and Yb^{3+} ions / E. Kolobkova, A. Grabtchikov, I. Khodasevich // J. of Non-Crystalline Solids: X. – 2021. – V. 11, № 12. – P. 100065.
2. Auzel, F. History of upconversion discovery and its evolution / F. Auzel // J. Luminescence. – 2020. – V. 223. – P. 116900.
3. Ovsyankin, V. V. Cooperative sensitization of luminescence in crystal activated with rare earth ions / V. V Ovsyankin, P.P. Feofilov // JETPh. Lett. – 1966. – V. 4. – P. 317–318.

Секция 5. МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ И СИСТЕМЫ

УДК 546.05

ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО
ЧЕТВЕРНОГО МЕТАЛЛ-ОКСИДНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА Zr–Bi–Te–Fe–O
И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК

Горох Г. Г.¹, Федосенко В. С.¹, Чаевский В. В.¹, Эм М.¹, Ванг К.², Таратын И. А.³

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь

²Чжэцзянский университет, Ханчжоу
Китайская Народная Республика

³Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе представлен новый подход к синтезу многокомпонентных оксидных соединений системы Bi–Te–Fe–O, основанный на электрохимическом анодировании композиции Al/Zr и ионном осаждении оксидов на наностолбики оксида циркония. Описаны методы получения и результаты анализа микроструктуры, имеющей потенциал в фотокатализе и газовых сенсорах для экологических применений. **Ключевые слова:** оксидные соединения, многокомпонентные системы, электрохимическое анодирование, ионное наслаивание, фотокатализ.

HYDROCHEMICAL SYNTHESIS OF NANOSTRUCTURED QUATERNARY METAL-OXIDE
SEMICONDUCTOR Zr–Bi–Te–Fe–O AND ITS CHARACTERIZATION STUDY

Gorokh G.¹, Fiadosenka U.¹, Chaevsky V.¹, Em M.¹, Wang X.², Taratyn I.³

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

²Zhejiang University
Hangzhou, P. R. China

³Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. This work presents a new approach to the synthesis of multicomponent oxide compounds in the Bi–Te–Fe–O system, based on the electrochemical anodization of an Al/Zr composition and the ion deposition of oxides onto zirconium oxide nanocolumns. The methods of synthesis and the results of microstructural analysis are described, highlighting their potential in photocatalysis and gas sensors for environmental applications.

Key words: oxide compounds, multicomponent systems, electrochemical anodization, ion layering, photocatalysis

Адрес для переписки: Горох Г. Г., ул. П.Бровки, 6, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: gorokh@bsuir.by

Двойные, тройные и четверные оксидные соединения металлов привлекают широкое внимание у исследователей благодаря уникальным свойствам и находят применения в качестве люминесцентных, фотовольтаических, каталитических, газочувствительных, медицинских и керамических материалов [1–3]. В этой связи актуальным становится формирование и исследование многокомпонентных оксидных систем, создание моделей фазообразования и физико-химических процессов, изучение свойств образующихся в системах новых фаз и их трансформаций [4].

В настоящей работе предлагается новый технологический подход при синтезе соединений системы Bi–Te–Fe–O, основанный на электрохимическом анодировании двухслойной композиции Al/Zr и осаждения на матрицу образованных металл-оксидных столбиков оксидов металлов других групп из водных растворов. Приведены ре-

зультаты исследований микроструктуры и состава образованных оксидных систем и фазовых преобразований в результате высокотемпературного отжига. Наноконпозиты оксидов висмута, циркония теллура и железа проявляют высокую активность в фотокатализе, что полезно для экологических применений, таких как очистка воды и воздуха. Потенциальное применение такого композита в газовых сенсорах для мониторинга качества воздуха и промышленной безопасности, а также в энергетических системах и аккумуляторах.

В качестве исходных образцов использовались кремниевые подложки, на которые методом магнетронного напыления в вакууме были осаждены слои Zr (99,95 %) толщиной 200 нм и Al (99,999 %) толщиной 1,5 мкм. Электрохимическое анодирование проводилось в комбинированном режиме. Верхний слой алюминия анодировали в водном растворе 0,4 М C₂H₂O₄ при 40 В, в

результате чего образовалась матрица с шестиугольными оксидными ячейками и вертикальными порами. Анодирование подслоя циркония через поры проводилось в водном растворе 0,2 М $C_6H_8O_7$ при 250 В, что привело к формированию наностолбиков оксида циркония под порами. После этого маска из оксида алюминия была удалена в 50 %-м растворе H_3PO_4 при 323 К.

Ионное осаждение оксидов висмута, теллура и железа на наностолбики оксида циркония проводилось в 30 циклов. Каждый цикл включал в себя обработку образца в катионных и анионных растворах по 15 сек и промывку в дистиллированной воде в течении 5 сек. В качестве катионных растворов использовались 0,05 М $Bi(NO_3)_3$ + 70 капель триэтанолamina (TEA) и 0,05 М $Fe(NO_3)_3$; В качестве анионных растворов использовали нагретую до 70 °С воду и 0,05 М Na_2TeO_3 .

Отжиг образцов проводился в вакуумной трубчатой печи CVD BTF-1200C Beiyike с системой газоснабжения CVD GMF-3Z Beiyike. Морфология и структура исследовались с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Hitachi SU5000, а химический состав поверхности определялся методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) на приборе VG ESCALAB Mark 2.

На рисунке 1 показаны СЭМ изображения созданных структур оксида циркония до и после нанесения пленки оксидов висмута, железа и теллура. Количество наностолбов соответствовало количеству пор в маске оксида алюминия, высота наностолбов составила порядка 45 нм при диаметре 110 нм. Пленка $Bi-Te-Fe-O$ (рисунок 1 в и з) полностью заполнила промежутки между наностолбами и покрыла их на толщину приблизительно 250 нм. Однако после отжига 700 °С пленка просела и локализовалась (рисунок 1 д и е).

Методом энергодисперсионной спектроскопии было определено, что атомарное соотношение Bi, Fe, Te и Zr на циркониевых наноструктурах с учетом всех элементов, входящих в состав пленок, составило $Bi - 9,15 \%$; $Te 5,83 \%$; $Fe - 7,59 \%$ и $Zr - 12,39 \%$.

Анализ данных рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS, рисунок 2) указывает на возможность образования сложных оксидов после отжига. До отжига пики $Bi 4f 7/2$ (155,64 эВ) и $4f 5/2$ (161,02 эВ) относятся к оксиду висмута (Bi_2O_3). Пики $Zr 3d 5/2$ (179 эВ) и $3d 3/2$ (180,89 эВ) совпадают с оксидом циркония (ZrO_2). Теллур $3d 5/2$ (567,2 эВ) и $3d 3/2$ (528,8 эВ) указывают на TeO_2 . Пики $Fe 2p 3/2$ (707 эВ) и $2p 1/2$ (721 эВ) близки к Fe_2O_3 (оксид железа) и пики $O 1s$ и $C 1s$ могут быть связаны с органическими загрязнениями и оксидными структурами. После отжига есть вероятность образования более сложных соединений, таких как многокомпонентные оксиды (например, $Bi_2Fe_4O_9$, $ZrFeO_3$ или $FeTeO_3$), поскольку такие соединения

обычно характеризуются смещением энергии связи и расширением пиков. Более подробные фазовые трансформации таких композитов требуют дополнительного изучения.

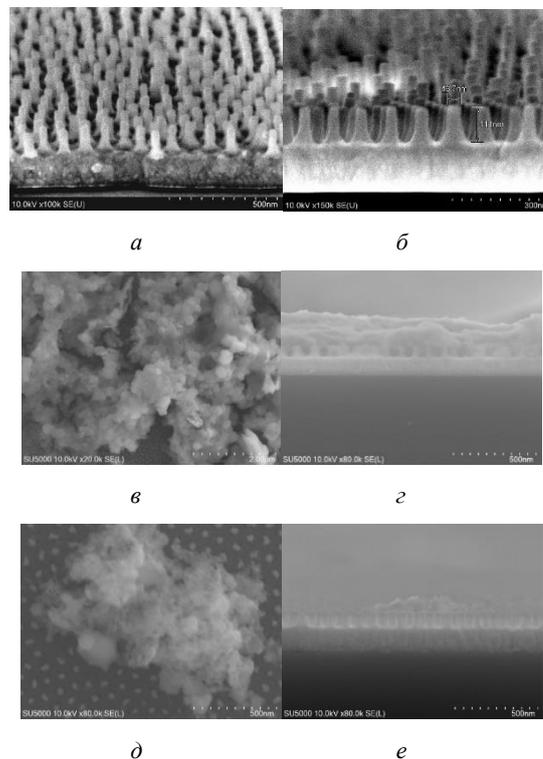


Рисунок 1 – СЭМ изображения столбиковых наноструктур ZrO_2 (а) и (б); СЭМ изображения столбиковых наноструктур ZrO_2 после нанесения соединений системы $Bi-Te-Fe-O$: поверхность (в) и скел (з); СЭМ изображения столбиковых наноструктур ZrO_2 с пленкой соединения $Bi-Te-Fe-O$ после отжига при 700 °С: поверхность (д) и скел (е)

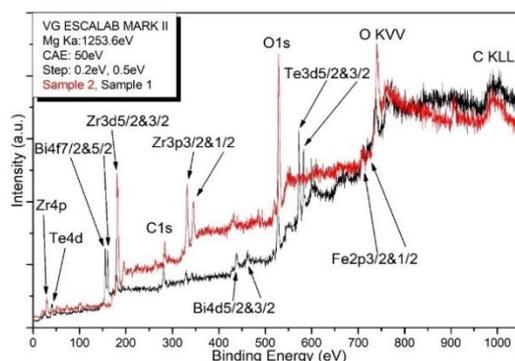


Рисунок 2 – Общие спектры XPS сформированных образцов

Литература

1. Maciulis V. Recent advances in synthesis and application of metal oxide nanostructures in chemical sensors and biosensors / V. Maciulis, A. Ramanaviciene, I. Plikusiene // *Nanomaterials*. – 2022. – V. 12, №. 24. – P. 4413.
2. Recent advances of layered-transition metal oxides for energy-related applications / Z. Lei [et al.] // *Energy Storage Materials*. – 2021. – V. 36. – P. 514–550.

3. Effect of redox cocatalysts location on photocatalytic overall water splitting over cubic NaTaO_3 semiconductor crystals exposed with equivalent facets / Q. Zhang Q. [et al.] // *ACS Catalysis*. – 2016. – V. 6, №. 4. – P. 2182–2191.

4. Influence of annealing temperature on microstructure and phase transformations of oxide system $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ formed in aqueous solutions / G. Gorokh [et al.] // *Next Nanotechnology*. – 2024. – V. 5. – P. 100038.

УДК 539.2

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ФАЗЫ СИЛИЦИДА ТИТАНА

Анисович А. Г.¹, Маркевич М. И.², Щербакова Е. Н.³

¹Институт прикладной физики НАН Беларуси

²ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»

³Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены результаты исследования структуры и фазового состава пленок силицидов титана. Установлено, что быстрая термическая обработка ($T = 580\text{--}620^\circ\text{C}$, время 30 с) с использованием галогенных ламп позволяет сформировать слой дисилицида титана в модификации C49.

Ключевые слова: тонкие пленки, силицид титана, быстрый термический отжиг.

STUDY OF THE STRUCTURE OF THE SEMICONDUCTOR PHASE OF TITANIUM SILICIDE

Anisovich A.¹, Markevich M.², Shcherbakova E.³

¹Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus

²Physical-technical Institute of the NAS of Belarus

³Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The results of the study of the structure and phase composition of titanium silicide films are presented. It has been established that rapid heat treatment ($T = 580\text{--}620^\circ\text{C}$, time 30 s) using halogen lamps allows the formation of a layer of titanium disilicide in the C49 modification.

Key words: thin films, titanium silicide, rapid heat treatment.

Адрес для переписки: Щербакова Е. Н., ул. Я. Коласа, 22, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: scherbakova@bntu.by

При производстве больших интегральных схем (БИС) кремний является основным и базовым материалом. Кроме того, современные условия развития микроэлектроники требуют разработки новых БИС с высокой плотностью элементов, что вызывает необходимость развития субмикронных технологий, к переходу производства микросхем в нашей стране на топологическую норму до 0,35 мкм.

Создание перспективных гетероструктур на базе силицидов металлов значительно расширяет пределы электроники.

В последние годы наблюдается тенденция постоянного увеличения потребности в новых фотоприемниках, работающих в видимой и ультрафиолетовой областях спектра. Результаты анализа работ зарубежных и отечественных научных центров показывают, что особый интерес вызывают способы их производства, совместимые с кремниевой технологией [1, 2].

В этих случаях для субмикронной кремниевой технологии целесообразно применять тонкие пленки, состоящие из веществ, которые химически взаимодействуют с кремнием. Важным требованием является также близкое соответствие ковалентных радиусов атомов данных веществ с ато-

мами кремния. К таким материалам относится ряд 3d переходных металлов, таких как Cr, Fe, Co, Ti [3].

Для формирования пленок силицидов на кремнии необходимы неравновесные условия образования. В данной работе для достижения этих условий был выбран метод быстрой термической обработки (БТО). Исследовались процессы в гетероструктуре TiN/Ti/Si.

Для формирования низкоомной модификации силицида титана C49 использовалась твердофазная реакция. Перед началом собственно процесса получения данного силицида производилась очистка кремниевой подложки от слоя естественного окисла SiO_2 , затем на поверхность подложки было произведено последовательное напыление пленок Ti и TiN на установках магнетронного распыления «Varian m2i» и «Endura 5500 PVD». Заключительной стадией процесса являлась твердофазная реакция образования силицида, происходящая в области контакта металла с кремнием вследствие импульсной фотонной обработки.

Назначение слоя Ti заключалось непосредственно в образовании силицида TiSi_2 . Слой TiN выполнял функцию защиты титана от нежелательных реакций с активными газовыми приме-

сей, которые могут протекать при высокотемпературных обработках.

БТО проводилась галогенными лампами на установке Heatpulse 8108, спектральная характеристика которых представлена на рисунке 1.

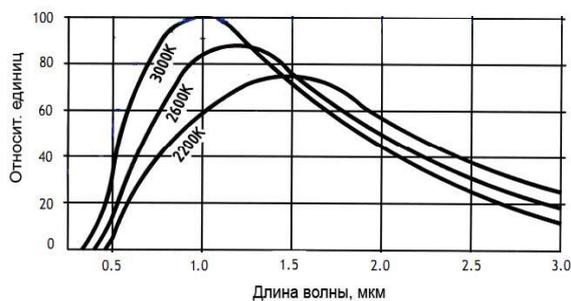


Рисунок 1 – Спектральная характеристика галогенных ламп

Исследования структуры и фазового состава пленок силицидов титана проводились методами просвечивающей электронной микроскопии и электронографии.

Согласно диаграмме состояния дисилицид титана имеет 2 структурные модификации: $\text{TiSi}_2(\text{C49})$ – низкотемпературная модификация с орторомбической базоцентрированной решеткой и $\text{TiSi}_2(\text{C54})$ – высокотемпературная модификация с орторомбической гранецентрированной решеткой [2, 4, 5], которые могут образовываться при используемых режимах БТО. При расшифровке электронограмм осуществлялось сравнение экспериментально полученных межплоскостных расстояний с теоретическими для данных силицидов.

На рисунке 2 представлена электронограмма пленок фазы TiSi_2 в модификации C49, полученных с использованием БТО при температуре отжига $600\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 секунд.

Исследования сформированной тонкопленочной системы осуществлялись также на сканирующем электронном микроскопе SEM 515, внешний вид которого представлен на рисунке 3. Микроскоп дает возможность наблюдать и фиксировать изображения микро- и нанообъектов в высоком разрешении.



Рисунок 2 – Электронограмма пленок фазы TiSi_2 в модификации C49, полученных с использованием БТО при температуре отжига $600\text{ }^\circ\text{C}$, время 30 с



Рисунок 3 – Сканирующий электронный микроскоп SEM 515 с приставкой для микроанализа

На рисунке 4 представлено поперечное сечение слоя TiSi_2 (C49), полученного с помощью сканирующей электронной микроскопии после БТО при температуре отжига $600\text{ }^\circ\text{C}$ время 30 с.

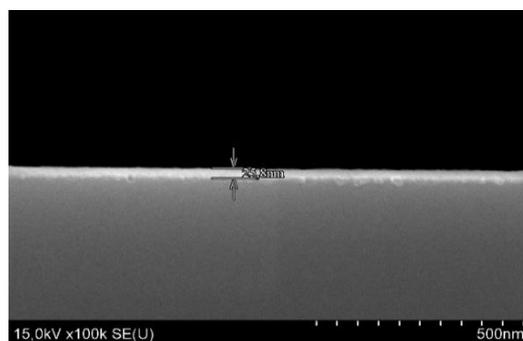


Рисунок 4 – поперечное сечение слоя TiSi_2 (C49), полученного после БТО при $T = 600\text{ }^\circ\text{C}$, время 30 с

Как показал проведенный анализ экспериментальных данных, полученных методом электронографии с последующей расшифровкой электронограмм, быстрая термическая обработка с использованием галогенных ламп при температурах в диапазоне $580\text{--}620\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 секунд позволяет сформировать слой дисилицида титана в модификации C49. В процессе данной термообработки формируется столбчатая структура пленки (высота зерна $\sim 26\text{ nm}$, диаметр зерна $\sim 300\text{ nm}$).

Литература

1. Баранов, В. В. Технологические предпосылки создания МОП-структур с малыми проектными нормами / В. В. Баранов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2005. – № 5. – С. 42–46.
2. Zhu, Yan. Fabrication and characterization of TiSi_2/Si heteronano-crystal metal-oxide-semiconductor memories / Yan Zhu, Bei Li, Jianlin Liu // Journal of Applied Physics. – 2007. –V. 101. – P. 063702-1–063702-4.
3. Маркевич, М. И. Структурные превращения в тонких металлических пленках при импульсном лазерном воздействии / М. И. Маркевич, А. М. Чапланов // Вести Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук. – 2016. – № 1. – 2016. – С.28–35.

УДК 621.763.893

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДАТЧИКА УГЛА НАКЛОНА НА ВИБРИРУЮЩЕМ ОСНОВАНИИ

Антонов М. С.¹, Таратын И. А.¹⁻³

¹Отраслевая научно-исследовательская лаборатория инновационных приборов МЭМС-технологий, Белорусский национальный технический университет

³Минский научно-исследовательский институт радио материалов
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Применение компьютерного моделирования и аналитического расчета, для получения основных характеристик высокочувствительного датчика угла наклона на вибрирующем основании.

Ключевые слова: датчик угла наклона, компьютерное моделирование, метод конечных элементов.

COMPUTER SIMULATION OF THE CHARACTERISTICS OF A HIGHLY SENSITIVE TILT ANGLE SENSOR ON A VIBRATION BASE

Antonov M., Taratyn I.

Industry research laboratory of innovation devices of MEMS technologies

Belarusian National Technical University

Minsk research institute of radio materials

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Application of computer modeling and analytical calculation to obtain the main characteristics of a highly sensitive tilt angle sensor on a vibration base.

Key words: tilt angle sensor, computer simulation, finite element method.

Адрес для переписки: Антонов М. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: matvey3378@gmail.com.

В настоящее время для расчетов параметров микромеханических элементов датчиков угла наклона широко применяется моделирование основанное на методе конечных элементов. В данной работе расчет проводился в программе ANSYS, что позволило нам провести расчет собственной частоты, величину отклонения инерционной массы при вибрации основания, на котором закреплен чувствительный элемент, а также величину деформации. Результаты расчетов представлены в таблице 1, в таблице 2 и на рисунках 1–4.

Так же был проведен аналитический расчет собственной частоты и отклонения конца инерционной массы закрепленного на вибрирующем основании используя формулы (1), (2) [1].

$$P_{1,2}^2 = 2 \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (1)$$

$$S_{yr+av_{1,\gamma}} = \frac{m(k_{11}a^2 - 2ak_{12})}{\Delta_1} \quad (2)$$

Расчетное значение собственной частоты колебаний подвеса толщиной 30 мкм и шириной 300 мкм, для первой и второй моды составляет $P_1 = 99$ Гц и $P_2 = 640$ Гц. Величина отклонения 22,3 мкм

Сравнение результатов компьютерного моделирования и аналитического расчета показывает на удовлетворительное совпадение. Разница между компьютерным моделированием и аналитическим расчетом составила < 10 %.

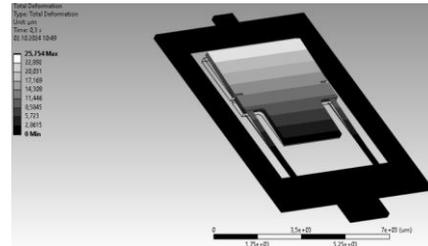


Рисунок 1 – Максимальное отклонение инерционной массы, ширина подвеса 300 мкм, толщина 30 мкм

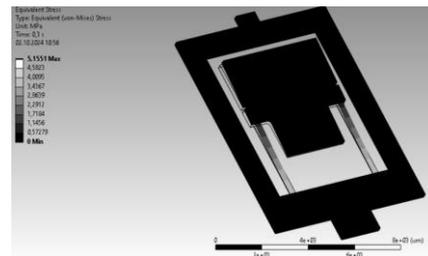


Рисунок 2 – Распределение механических напряжений в подвесах чувствительного элемента, при ширине подвеса 300 мкм, толщине 30 мкм

Таблица 1 – Ширина подвеса 300 мкм

Толщина подвеса, мкм	20	30	40
Частота 1-ой моды, Гц	65	119	182
Максимальное отклонение, мкм	83,62	25,75	10,91
Максимальное механическое напряжение, МПа	11,03	5,1	2,9

Таблица 2 – ширина подвеса 500 мкм

Толщина подвеса, мкм	20	30	40
Частота 1-ой моды, Гц	83	152	234
Максимальное отклонение, мкм	52,05	15,538	6,59
Максимальное механическое напряжение, МПа	6,68	3,053	1,74



Рисунок 3 – Максимальная отклонение инерционной массы, ширина подвеса 500 мкм, толщина 30 мкм

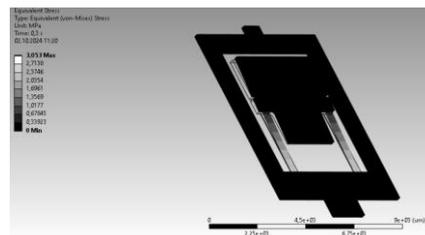


Рисунок 4 – Распределение механических напряжений в подвесах чувствительного элемента, при ширине подвеса 500 мкм, толщине 30 мкм

Данная работа была выполнена в ходе выполнения НИР 3.17.1 по ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций».

Литература

1. Распопов В.Я Микромеханические приборы: учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2004.

УДК 53.087.93

КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГАЗОВЫХ МИКРОСИСТЕМ

Антонов М. С., Реутская О. Г.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Компьютерное моделирование и анализ полученных результатов позволяет учитывать особенности при изготовлении чувствительных элементов газовых микросистем с применением микроэлектронных технологий. В результате конечно-элементного моделирования в программе ANSYS 2023 было определено влияния температуры на распределение тепловых полей, деформации и механических напряжений в порожках пористого оксида алюминия. Установлены зависимости деформации и механических напряжений от температуры. **Ключевые слова:** Компьютерное моделирование, газовая микросистема, температура, деформация, механическое напряжение.

COMPUTER ANALYSIS OF SENSITIVE ELEMENTS OF GAS MICROSYSTEMS

Antonov M., Reutskaya O.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Computer modeling and analysis of the obtained results allows taking into account the features in the manufacture of sensitive elements of gas microsystems using microelectronic technologies. As a result of finite element modeling in the ANSYS 2023 program, the influence of temperature on the distribution of thermal fields, deformation and mechanical stresses in porous aluminum oxide substrates was determined. Dependences of deformation and mechanical stresses on temperature were established.

Key words: Computer modeling, gas microsystem, temperature, deformation, mechanical stress.

*Адрес для переписки: Антонов М. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: matvey3378@gmail.com.*

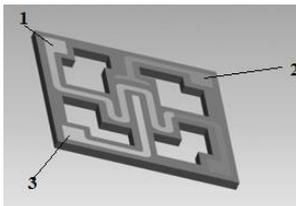
Развитие промышленности интенсивными темпами приводит к увеличению нагрузки на техногенную среду, к реальной угрозе здоровью людей и нанесению невосполнимого ущерба. В странах с развитой промышленностью уделяется особое внимание созданию и разработке газоаналитического оборудования и систем мониторинга окружающей среды. В основу таких систем следует включать газоаналитические приборы на основе газовых сенсоров, для создания которых используют современные микроэлектронные технологии. Они способны обеспечивать высокий и эффективный контроль за процессами загрязнения воздуха.

Разработка новых датчиков для обнаружения различных газов в окружающей среде включает в себя ряд этапов. Одним из них является построение и анализ компьютерной модели в системах автоматического проектирования. Включение такого этапа в разработку позволяет снизить стоимость создаваемого изделия. Для исследования элементов газовых микросистем была построена модель сенсора на подложке пористого оксида алюминия при помощи программы ANSYS 2023.

Выбор режимов работы газовых микросистем определяется рядом параметров, включающих тепловые потери и распределения температурных полей в чувствительном элементе сенсоров. Диа-

пазон измерения газов зависит от температуры нагрева чувствительной части сенсора. В свою очередь тепловые потери определяют мощность потребления датчиков.

При выполнении данной работы было проведено моделирование элементов газовой микросистемы на подложке пористого оксида алюминия толщиной 60 мкм. На «рисунке 1» изображена построенная модель чувствительного элемента газовой микросистемы, выполненной на подложке пористого Al_2O_3 , характеристики которого представлены в таблице 1.



1 – Нагревательный элемент; 2 и 3 – информационные электроды

Рисунок 1 – Модель чувствительного элемента газовой микросистемы выполненной на подложке пористого Al_2O_3

Таблица 1– Основные характеристики пористого оксида алюминия в прамме расчета ANSYS 2023

КТЛР, $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{K}$	Модуль Юнга E, ГПа	Удельная теплоемкость, Дж/Кг*К	Теплопроводность, Вт/м* $^\circ\text{K}$	Плотность, г/см 3
5,2	447	750	25	3,9

При расчете применялись следующие параметры: тетрагональная сетка с количеством узлов – 416200, количество элементов сетки – 225788, минимальный размер элемента сетки – 0,099 мкм. Подложка выполнена из пористого оксида алюминия толщиной 60 мкм. Электроды выполнены из платины толщиной 0,5 мкм. Зазор между нагревателем и информационными электродами составил 10 мкм. На нагреватель подавалась температура 400 $^\circ\text{C}$. Выбор диапазона рабочих температур определялся режимами обнаружения горючих и токсичных газов [1].

На рисунках 2, 3 и 4 представлены результаты моделирования элемента микросистемы при температуре нагрева 400 $^\circ\text{C}$.

Как видно из рисунка 2 процесс распределения температуры происходит равномерно.

Полученное поле деформации показывает, что ее разделение симметрично и отличается незначительно относительно элементов сенсора при воздействии температуры 400 $^\circ\text{C}$ (рисунк 3). Из рисунка 4 видно, что возникающее напряжения не превышает предельного значения и составляет $E = 447$ ГПа.

В результате проведенных расчетов и моделирования тепловых процессов в чувствительных элементах микросистемы, установлены зависимости изменения деформации и механического

напряжения от температуры, которые представлены на рисунках 5 и 6 соответственно.

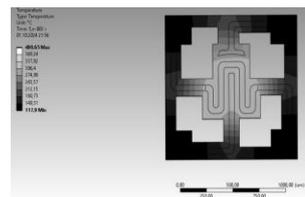


Рисунок 2 – Распределения тепловых полей в чувствительном элементе микросистемы при температуре 400 $^\circ\text{C}$

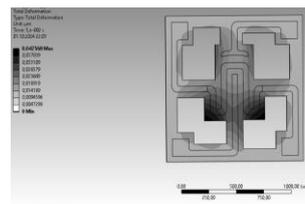


Рисунок 3 – Поле деформации, возникающее в чувствительном элементе микросистемы при воздействии 400 $^\circ\text{C}$

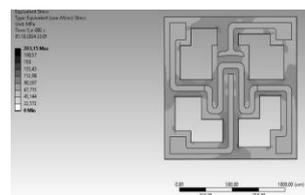


Рисунок 4 – Поле механических напряжений в чувствительном элементе газовой микросистемы при воздействии температуры 400 $^\circ\text{C}$

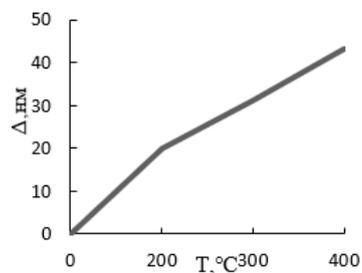


Рисунок 5 – Зависимость изменения деформации от температуры в чувствительном элементе газовой микросистемы

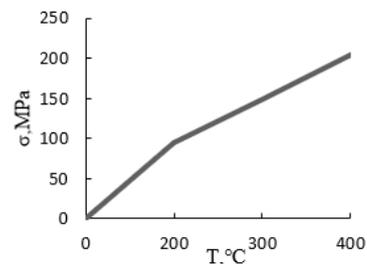


Рисунок 6 – Зависимость механического напряжения от температуры в чувствительном элементе газовой микросистемы

Полученные результаты моделирования были использованы для разработки и создания макетов газовых сенсоров с применением лазерной технологии обработки поверхности диалектических пластин.

Литература

1. Девясилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум / В. А. Девясилов, Т. И. Дроздова, С. С. Тимофеева // учебное пособие под общ. ред. В.А. Девясилова. – М. : ФОРУМ, 2012. – 352 с.

УДК 621.763.893

3D-ПЕЧАТЬ НАНООБЪЕКТОВ

Антонов М. С.¹, Чижик С. А.^{1,2}

¹Белорусский национальный технический университет

²Институт тепло- и массообмена НАН Беларуси

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Создание неорганических материалов с разработанными трехмерными наноструктурами – быстро развивающаяся область исследований и промышленного применения. В данной работе проведен анализ современных методов 3D-печати высококачественных наноструктур. И предложен новый метод с использованием атомно силового микроскопа и двухфотонной полимизации для создания объектов из SiO₂ с разрешением менее 200 нм и гибкой возможностью легирования редкоземельными элементами.

Ключевые слова: МЭМС, 3D-печать, нанокompозитные чернила, двухфотонная полимеризация.

3D-PRINTING NANOOBJECTS

Antonov M.¹, Chizhik S.^{1,2}

¹Belarusian National Technical University

²Heat and Mass Transfer NAS of Belarus

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The creation of inorganic materials with developed three-dimensional nanostructures is a rapidly developing field of research and industrial applications. In this paper, an analysis of modern methods of 3D printing of high-quality nanostructures is carried out. And a new method has been proposed using atomic force microscope and two-photon polymerization to create SiO₂ objects with a resolution of less than 200 nm and a flexible possibility of alloying with rare earth elements.

Key words: MEMS, 3D printing, nanocomposite ink, two-photon polymerization.

Адрес для переписки: Антонов М. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: matvey3378@gmail.com

Наноструктурированные неорганические материалы имеют многообещающий потенциал применения и привлекли огромное внимание исследователей как с фундаментальной, так и с практической точек зрения. Диоксид кремния (SiO₂) является одним из наиболее широко используемых неорганических материалов, для изготовления которого требуются методы с наноразмерным разрешением в таких областях, как микроэлектроника, микроэлектромеханические системы (МЭМС) и микрофотоника. Для получения неорганических материалов с желаемыми наноструктурами обычно требовались сложные процессы формирования структуры «сверху вниз», включающие термическое окисление и химическое осаждение из газовой фазы, за которыми следовали этапы сухого или мокрого травления [1].

Были разработаны методы обработки с высоким выходом такие как фотолитография, электровзрыв, нестехеометрическое соединение и т. д. Эти методы включают использование опасных химикатов (например, резистов, проявителей, травителей и т. д.) и требуют сложных установок для изготовления. Более того, достижение сложных и/или асимметричных трехмерных (3D) архи-

тектур с нанометровым разрешением является сложной задачей при использовании методов изготовления «сверху вниз». Таким образом, растет спрос на прямые нанотехнологии производства, которые могут производить трехмерные неорганические структуры со сложной геометрией и химической изменчивостью [1].

Аддитивное производство (АП), также известное как 3D-печать, за последнее десятилетие приобрело популярность. АП – это технология производства «снизу вверх», которая позволяет создавать более сложные конструкции и потенциально снижает дефекты материала, которые в противном случае возникли бы в результате литья или литья под давлением. Одним из основных преимуществ 3D-печати является быстрое создание прототипов, которое снижает затраты и ускоряет процесс разработки и внедрения новых технологий и продуктов. АП все еще находится на ранней стадии внедрения, но его рост составляет 25 % в год [2].

Широкую популярность приобрели такие методы 3D-печати как [3]:

– лазерное спекание порошков (selective laser sintering, SLS);

- лазерная стереолитография (stereo laser lithography, SLA);

- ламинирование листовых материалов (laminated object manufacturing, LOM);

- экструзионная печать или технология послойного наплавления материала (fused deposition modeling, FDM).

Новым развивающимся методом наноразмерной 3D-печати является комбинированное использование атомно-силового микроскопа (АСМ) и двухфотонной полимеризации. Метод включает в себя нанесение при помощи АСМ высокодисперсных нанокompозитных чернил, функционализированных коллоидным кремнеземом, с использованием технологии двухфотонной полимеризации для спекания полимера. Важно отметить, что АСМ являются не только мощным исследовательским инструментом, но также позволяют проводить модификацию поверхности (силовая литография, электрическая модификация, локальное анодное окисление, «зарядовое письмо», dip-rep нанолитография), а также манипулировать микро- и нанообъектами на поверхности (манипуляция атомами, нанотрубками, различными органическими молекулами, биологическими объектами). Таким образом, методы АСМ обеспечивают решение задачи в различных областях науки и техники (микроэлектроника, материаловедение, приборостроение, фармацевтика, химия, биология, биохимия, медицина, геология и др.) [3].

Двухфотонная фотополимеризация, технология прямой записи на основе лазера, при которой полимер инициирует свободнорадикальную полимеризацию путем одновременного поглощения двух фотонов. После двухфотонной фотополимеризации, используется пиролиз и спекание, эти процедуры последующей обработки определяют кристалличность полученных структур [4].

Для создания 3D-нанообъектов используются специальные «нано-чернила» (НЧ). Такие чернила должны соответствовать нескольким условиям. Во-первых, размер частиц кремния в нанокompозитных чернилах должен быть небольшим (около 10 нм) для достижения наномасштабного разрешения. Во-вторых, показатель преломления фотополимерной смеси прекурсоров должен соответствовать показателю преломления кремния для получения прозрачных чернил, для устранения фотозатухания и рассеивания. В-третьих, теплопроводность нанокompозитных чернил должна быть высокой, чтобы избежать мгновенного испа-

рения. В-четвертых, чернила должны быть однородными и хорошо диспергированными для поддержания наномасштабного разрешения, а также для предотвращения локализованного испарения. В-пятых, массовая загрузка неорганических НЧ должна быть высокой для поддержания напечатанной геометрии и минимизации деформации [5].

На рисунке 1 представлено изображение образца дисковой конструкции на ферменных опорах полученное с помощью растрового электронного микроскопа.

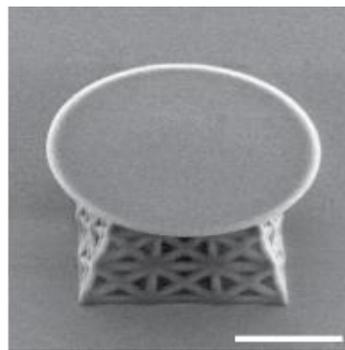


Рисунок 1 – Дисковая конструкция на ферменных опорах, (масштабная линейка 10 мкм) [1].

Таким образом использование АСМ, нанокompозитных чернил и двухфотонной полимеризации позволяет создавать высококачественные неорганические наноструктуры. Метод обеспечивает возможность 3D-печати неорганических кремниевых структур с разрешением менее 200 нм с контролируемой кристалличностью и легированием. Данный метод можно использовать в микроэлектронике, микрофотонике, для создания микроэлектромеханических систем (МЭМС).

Литература

1. 3D-printed silica with nanoscale resolution / X. Wen [et al.] // *Nat. Mater.* – 2021. – V. 20. – P. 1506–1511.
2. Wohlers Associates. Wohlers Report 2018: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry. Fort Collins, Co. – 2018.
3. Пермяков, Н. В Развитие аппаратно-методических средств атомно-зондовой технологии для получения и диагностики наноразмерных объектов : дис. канд. тех. наук: 05.27.06. – М., СПб., 2018. – 180 с.
4. Mueller, B. Additive Manufacturing Technologies – Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing / B. Mueller // *Assembly Automation.* – 2012. – V. 32, № 2.
5. Additive manufacturing: applications and directions in photonics and optoelectronics / A. Camposeo [et al.] // *Adv. Opt. Mater.* – 2019. – V. 7. – P. 1800419.

УДК 681.586.7

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПЭТФ ТМ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫМИ ДВУХСЛОЙНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Баранова А. С.¹, Мельникова Г. Б.¹, Сапсалёв Д. В.¹, Толстая Т. Н.¹, Жумназар Н. Н.³,
Чижик С. А.^{1,2}, Корольков И. В.^{3,4}, Здоровец М. В.^{3,4}

¹Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

³Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева

⁴Астанинский филиал РГП на ПХВ Института ядерной физики

Министерства энергетики Республики Казахстан

Астана, Республика Казахстан

Аннотация. Разработаны двухслойные покрытия ПЭИ, ПЭИ⁺ и ПФОДА для чувствительных слоев гибких датчиков на основе ПЭТФ ТМ. Методом атомно-силовой микроскопии изучены топография поверхности, морфологические характеристики модифицированных двухслойными покрытиями ПЭТФ ТМ.

Ключевые слова: полиэтилентерефталатные трековые мембраны, полиэтиленимин, перфтороктадекановая кислота.

MODIFICATION OF PET TM SURFACE BY NANOSTRUCTURED BILAYER COATINGS

Baranova A.¹, Melnikova G.¹, Sapsalev D.¹, Tolstaya T.¹, Chizhik S.^{1,2}, Korolkov I.^{3,4}, Zdorovets M.^{3,4}

¹GNU "Institute of Heat and Mass Transfer named after A.V. Lykov NAS of Belarus"

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

³Eurasian National University named after L.N. Gumilev

⁴Astana Branch of RSE on PCV Institute of Nuclear Physics of the Ministry

of Energy of the Republic of Kazakhstan

Astana, Republic of Kazakhstan

Abstract. Two-layer coatings of PEI, PEI⁺ and PFODA have been developed for sensitive layers of flexible sensors based on PET TM. The surface topography and morphological characteristics of modified two-layer coatings of PET TM have been studied by atomic force microscopy.

Key words: polyethylene terephthalate track membranes, polyethylenimine, perfluorooctadecanoic acid.

Адрес для переписки: Баранова А. С., ул. П. Бровки, 15, Минск 220072, Республика Беларусь

e-mail: alesyanova@bk.ru

Гибкие сенсоры актуальны для применения в портативных устройствах благодаря легкости их использования, способности адаптироваться к сложным поверхностям, а также эластичности [1]. Это позволяет использовать такие сенсоры в устройствах для непрерывного мониторинга физиологических параметров, биомедицинских приложениях, робототехники, системах мониторинга окружающей среды и т.д. Полиэтилентерефталат зарекомендовал себя как подходящая подложка для полимерной электроники благодаря своей химической стойкости, высокой механической прочности и высокой температуре плавления [2]. Для оптимизации свойств подложки используют различные модификации и чувствительные слои, улучшающие адгезию, увеличивающие чувствительность сенсора к целевым веществам и повышающие стабильность в различных условиях эксплуатации.

Материалы и методы. В работе использованы полиэтилентерефталатные трековые мембраны (ПЭТФ ТМ) с диаметром пор 50, 100 и 200

нм [3]. В качестве модификатора в работе использованы полиэтиленимин, улучшающий взаимодействие с аналитами, в качестве чувствительного слоя – перфтороктадекановую кислоту, обеспечивающую гидрофобность и химическую стойкость. Формирование тонких слоев на поверхности мембран осуществляли по технологии послойного осаждения полиэлектролитов («Layer-by-Layer» (LbL)-технология). Предварительно промытые в дистиллированной воде мембраны (размер 1,5×1,5 см) выдерживали в растворах полиэлектролитов с концентрацией 1 мг/мл: водном растворе полиэтиленимина (ПЭИ, Mw ~750 кДа) и солянокислом растворе полиэтиленимина (ПЭИ⁺, растворитель – 0,1 М HCl) в течение 24 ч. Затем модифицированные образцы мембран промывали в токе дистиллированной воды и высушивали на воздухе в течение 24 ч.

Чувствительные слои формировали на поверхности модифицированных мембран методами Ленгмюра–Блоджетт. Мономолекулярные слои перфтороктадекановой кислоты (ПФОДА,

$\text{CF}_3(\text{CF}_2)_{16}\text{COOH}$, AlfaAesar) выделяли из раствора в гексафторбензоле с концентрацией 1 мг/мл при $\pi = 10,0$ мН/м. Выбранные параметры поверхностного давления (π), согласно изотермам сжатия, соответствуют фазовому состоянию «твердая пленка» для ПФОДА.

Анализ морфологии поверхности до и после модификации проводили методом атомно-силовой микроскопии (АСМ, установка НТ-206, ОДО «Микротестмашины», Республика Беларусь) с использованием стандартных кремниевых кантилеверов NSC 11 А с жесткостью 3 Н/м («Mickromash», Эстония) и радиусом кривизны не более 10 нм.

Результаты и их обсуждение. На основании данных АСМ о структуре и морфологических характеристиках поверхности показано, что в результате модификации ПЭТФ ТМ / ПЭИ и ПЭТФ ТМ / ПЭИ⁺ с диаметрами пор 50 и 100 нм ЛБ-покрытия на основе ПФОДА формируются тонкий плотный монослой модификатора, в ряде случаев обволакивающий границы и закрывающий поры ТМ (рисунок 1). Значения R_a и R_q незначительно уменьшаются по сравнению с исходными мембранами (таблица 1).

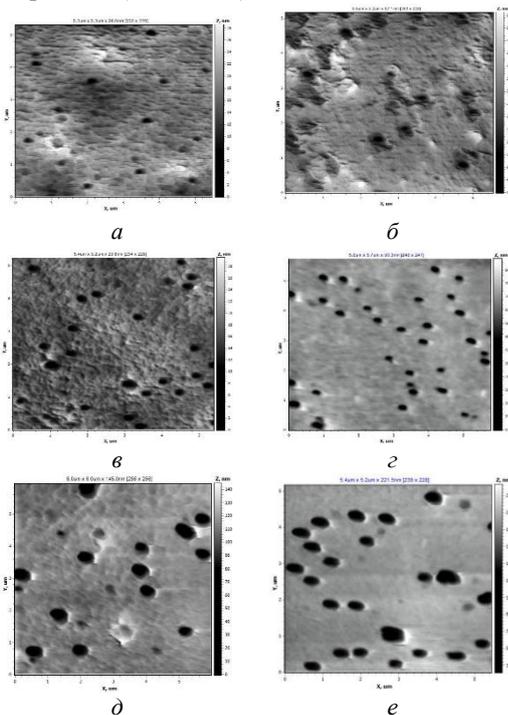


Рисунок 1 – АСМ-структура поверхности мембран: ПЭТФ-50 ТМ/ ПЭИ/ ПФОДА (а), ПЭТФ-50 ТМ/ ПЭИ⁺/ ПФОДА (б), ПЭТФ-100 ТМ/ ПЭИ/ ПФОДА (в), ПЭТФ-100 ТМ/ ПЭИ⁺/ ПФОДА (г), ПЭТФ-200 ТМ/ ПЭИ/ ПФОДА (д), ПЭТФ-200 ТМ/ ПЭИ⁺/ ПФОДА (е)

В результате модификации мембран с диаметром пор 200 нм поры остаются открытыми, о чем свидетельствуют значения Z (разница между максимальным и минимальным значениями высоты).

Пленка полиэлектролита ПЭИ⁺ придает поверхности ТМ положительный заряд, что в последующем позволяет направленно ориентировать монослой амфифильной кислоты PFODA, структурировать ЛБ-слой и увеличить степень связывания полиэлектролит – амфифильное вещество. амфифильное вещество.

Таблица 1 – Значения разницы наивысшей и наименьшей высотами (dZ), среднеарифметической (R_a) и среднеквадратической (R_q) шероховатости поверхности исходных и модифицированных ПЭТФ ТМ, область сканирования 5×5 мкм

Тип мембраны		Исходные образцы	ПЭТФ / ПЭИ / ПФОДА	ПЭТФ / ПЭИ ⁺ / ПФОДА
ПЭТФ-50	R_a , нм	3,01	1,84	3,79
	R_q , нм	3,92	2,47	5,12
	dZ , нм	11,31	19,34	27,77
ПЭТФ-100	R_a , нм	2,96	1,69	2,56
	R_q , нм	4,02	2,47	4,55
	dZ , нм	26,62	23,29	16,6
ПЭТФ-200	R_a , нм	3,68	6,07	9,19
	R_q , нм	5,43	6,00	19,6
	dZ , нм	12,88	36,92	43,07

Формирование плотного однородного слоя полиэлектролита ПЭИ и ПЭИ⁺ позволяет в последующем достичь равномерного распределения монослойного ЛБ-покрытия на основе ПФОДА на ПЭТФ ТМ.

Заключение. Таким образом, установлено, что ПЭИ и ПЭИ⁺ с ПФОДА формируют равномерный слой на поверхности ПЭТФ ТМ. Наблюдается частичное закрытие пор и незначительное уменьшение шероховатости для мембран с диаметром пор 50 и 100 нм. Разработанные двухслойные покрытия для ТМ перспективны в качестве гибких датчиков анализа катионов металлов в воде, позволяют увеличить срок службы мембран за счет снижения десорбции модифицирующего покрытия.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Договор № Т24МС-008 от 02.05.2024).

Литература

1. Flexible Sensors—From Materials to Applications / J. C. Costa [et al.] // Technologies. – 2019. – V. 7, № 2. – P. 35.
2. Phasuksom, K. Electroless Copper Deposition on PET Sheets / K. Phasuksom, W. Prissanaroon-Ouajai, N. Brack, P. Pigram // Advanced Materials Research. – 2013. – V. 802. – P. 262–266.
3. PET Ion-Track Membranes: Formation Features and Basic Applications / A. Kozlovskiy [et al.] // Nanocomposites, Nanostructures, and Their Applications. – 2019. – P. 461–479.

УДК 533.924

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ОТВЕРСТИЙ В ПОЛИИМИДЕ С КОНТРОЛИРУЕМЫМ УГЛОМ НАКЛОНА БОКОВЫХ СТЕНОК В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТОПРИЕМНОЙ МАТРИЦЫ

Жамойть А. Е., Шидловский А. Г., Климович Т. А., Дмитрачук А. Л.

*ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Разработан процесс формирования переходных отверстий в полиимиде с контролируемым углом наклона боковых стенок в процессе изготовления неохлаждаемого теплового детектора болометрического типа методом плазмохимического травления с использованием жесткой металлической маски на основе пленки ванадия.

Ключевые слова: фотоприемная матрица, неохлаждаемый тепловой детектор болометрического типа, плазмохимическое травление, жесткая маска, полиимид.

A TECHNIQUE FOR FORMING TRANSITION HOLES IN POLYIMIDE WITH A CONTROLLED ANGLE OF INCLINATION OF THE SIDE WALLS DURING THE MANUFACTURE OF A PHOTODETECTOR MATRIX

Zhamoit A., Shydouski A., Klimovich T., Dmitrachuk A.

*INTEGRAL JSC – Managing Company of INTEGRAL Holding
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The process of forming transition holes in polyimide with a controlled angle of inclination of the side walls during the manufacture of an uncooled thermal detector of the bolometric type by plasma chemical etching using a rigid metal mask based on a vanadium film has been developed.

Key words: photodetector matrix, uncooled thermal detector of bolometric type, plasma-chemical etching, hard mask, polyimide.

*Адрес для переписки: Жамойть А. Е., ул. Корженевского, 16, г. Минск 220024, Республика Беларусь
e-mail: AZhamoit@integral.by*

Введение. Основным функциональным элементом неохлаждаемого теплового детектора болометрического типа является подвесная конструкция (пиксель) в виде резонатора Фабри-Перо [1], на которой происходит поглощения излучения и преобразования его в тепло. Подвесное исполнение обусловлено увеличением коэффициента поглощения падающего инфракрасного (ИК) излучения за счет многократного переотражения между поглощающим слоем чувствительного элемента и нижележащим отражающим слоем на основе пленки алюминия (рисунок 1).

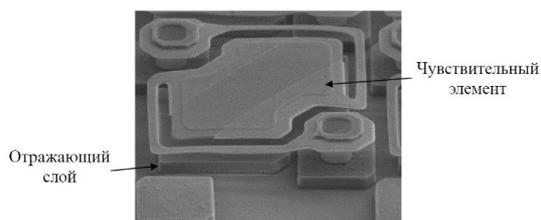


Рисунок 1 – Внешний вид сформированного пикселя

Последовательное формирование конструктивных слоев пикселя происходит на жертвенном слое, который удаляется после выполнения всех этапов изготовления фотоприемной матрицы. В качестве материала может использоваться полиимид.

Жертвенный слой полиимида представляет собой термоустойчивую полимерную пленку, не-

растворимую в обычных органических растворителях и является ключевым материалом в процессе изготовления подвесных конструкций.

Формирование наклонных стенок переходных отверстий в полиимиде необходимо для создания подвесных конструкций и обеспечения последующего запыления стенок отверстий металлическими пленками для качественного электрического контакта элементов пикселя со схемой считывания (мультиплексора).

Настоящая работа посвящена разработке методики формирования переходных отверстий в полиимиде с контролируемым углом наклона боковых стенок.

Методика проведения работы. Из-за структурной схожести, и, соответственно, низкой селективности травления пленки фоторезиста к полиимиду, в качестве маски для формирования микрорисунка на поверхности пленки полиимида обычно практикуется использование жестких масок на основе металлических пленок (алюминий, ванадий [2]).

Формирование пленки полиимида толщиной порядка 2,2 мкм проводилось на кремниевых пластинах методом центрифугирования. Далее пластины с нанесенной пленкой полиимида подвергались имидизации (сушке). Далее проводилось нанесение жесткой маски на основе пленки ванадия с толщинами 0,1 мкм, 0,3 мкм, 0,5 мкм с по-

следующим формированием микрорисунка методом контактной фотолитографии.

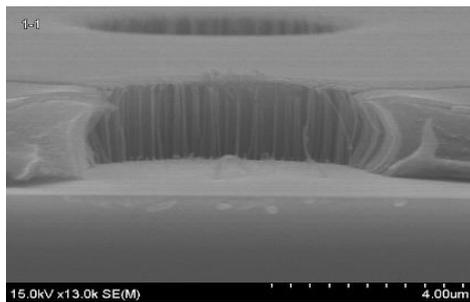


Рисунок 2 – Внешний вид переходного отверстия (жесткая маска не удалена)

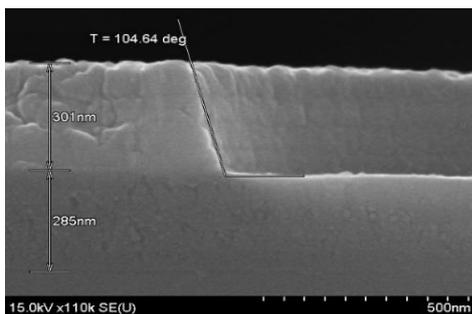


Рисунок 3 – Внешний вид окна в жесткой маске

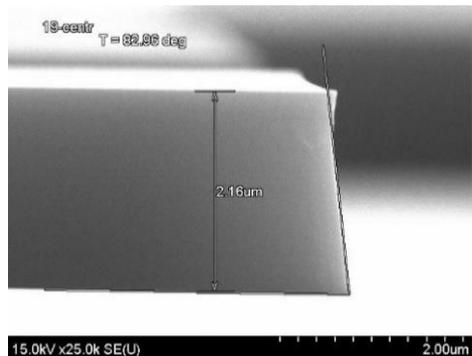


Рисунок 4 – Внешний вид переходного отверстия (жесткая маска удалена)

В качестве жесткой маски при опробовании изотропного процесса плазмохимического травления была использована жесткая маска на основе пленки ванадия. Использование такой жесткой маски позволяет минимизировать воздействие на низлежащие слои в процессах формирования данной маски.

Травление пленки ванадия производилось как методом жидкостного травления в растворе $\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:3$, так и плазмохимическим травлением в среде хлорной плазмы.

Травление имидизированной пленки полиимида проводилось плазмохимическим методом в плазмообразующей смеси кислорода и тетрафторметана.

По результатам травления оценивались поверхность и профиль как жесткой маски на основе ванадия, так и сформированных переходных отверстий в полиимиде.

Результаты и их обсуждение.

На первом этапе проводилось изготовление образца с толщиной жесткой маски 0,1 мкм. На рисунке 2 показано переходное отверстие, полученное после травления слоя полиимида, жесткая маска не удалена.

Как видно из рисунка, края контактных окон жесткой маски имеют неровную, «рваную» структуру. Это обусловлено использованием операции жидкостного травления.

В связи с этим дальнейшие работы проводились с использованием плазмохимического травления. На рисунке 3 показано окно в жесткой маске ванадия толщиной 0,3 мкм.

По сравнению с химическим травлением, боковые стенки окон имеют гладкую однородную структуру с четкой ровной границей, что является предъявляемым требованием для дальнейших операций травления полиимида, так как рельеф стенок жесткой маски напрямую влияет на сформированный профиль боковых стенок переходных отверстий в полиимиде.

Результаты плазмохимического травления полиимида через жесткую маску ванадия, толщиной 0,5 мкм представлены на рисунке 4.

Получаемый угол наклона боковой стенки – 83° . Боковые стенки сформированных переходных отверстий имеют гладкую однородную структуру.

Заключение. Установлено, что процесс формирования микрорисунка методом плазмохимического травления с использованием жесткой маски на основе пленки ванадия толщиной 0,5 мкм, позволяет получать промежуточные отверстия в полиимиде с углом наклона боковой стенки 83° .

Литература

1. Rogalski, A. Infrared Detectors for the Future / A. Rogalski // Acta Physica Polonica – 2009. – V. 116, № 3. – P. 389–406.
2. Mimoun, B. Residue-free plasma etching of polyimide coatings for small pitch vias with improved step coverage / B. Mimoun // J. Vac. Sci. Technol. B, Microelectron. Process. Phenom. – 2013. – V. 31, № 2. – P.201–210.

УДК 621.315.592

КОМПЕНСАЦИЯ НЕСООТВЕТСТВИЯ ПОКАЗАНИЙ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ НЕОХЛАЖДАЕМОГО МИКРОБОЛОМЕТРА

Климович Т. А., Жамойть А. Е., Занько А. И.

ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Тепловая инфракрасная визуализация получила большую популярность в применении по всему миру. Микроболометры – это тепловые датчики, используемые для получения инфракрасных изображений. Для повышения их производительности часто требуются методы компенсации. Компенсация используется для уменьшения влияния ошибок квантования. Она может включать в себя использование фильтров, алгоритмов коррекции или других методов, которые помогают улучшить качество сигнала после квантования. Параметры, используемые в процедуре компенсации, относятся к процессу обработки сигналов и данных, особенно в контексте цифровой обработки сигналов.

Ключевые слова: болометрический детектор, компенсация, пиксели.

COMPENSATION FOR DISCONFORMITY OF OPTICAL PARAMETERS FOR AN UNCOOLED MICROBOLMETER

Klimovich T., Zhamoit A., Zanko A.

INTEGRAL JSC – Managing Company of INTEGRAL Holding
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Thermal infrared imaging has gained great popularity in applications around the world. Microbolometers are thermal sensors used to acquire infrared images. Compensation techniques are often required to improve their performance. Compensation is used to reduce the effects of quantization errors. It may involve the use of filters, correction algorithms, or other techniques that help to improve the quality of the signal after quantization. The parameters used in the compensation procedure relate to the process of signal and data processing, particularly in the context of digital signal processing.

Key words: bolometer detector, compensation, pixels.

Адрес для переписки: Климович Т. А., ул. Корженевского, 16, г. Минск 220024, Республика Беларусь
e-mail: tanya.tatina.klimovich@mail.ru

Неохлаждаемые детекторы производятся с использованием сложного оборудования и самыми современными технологиями. Несмотря на хорошо контролируемые производственные процессы, детекторы подвержены влиянию разного рода отклонениям, такие как физические, электрические и тепловые [1].

Болометрический массив детекторов объединен со схемами считывания, которые обеспечивают электронный доступ к каждой ячейке детектора, представляющей собой пиксель (рисунок 1). Считывание матрицы можно производить с любого угла, в любом направлении.

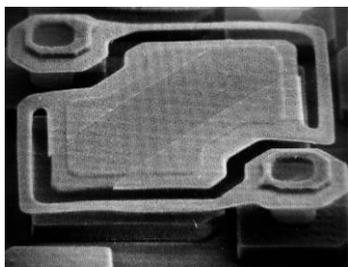


Рисунок 1 – Ячейка пикселя

В процессе изготовления сопротивление ИК-чувствительных датчиков может существенно от-

личаться друг от друга. В худшем случае, эта неравномерность может привести к снижению чувствительности показаний. Схема считывания предназначена для усиления слабого электрического сигнала из-за излучения и удаления нежелательных сигналов.

В болометрическом детекторе используется полный мост Уинстона, что дает возможность обрабатывать очень малые изменения сигнала и, следовательно, достигать требуемой высокой чувствительности.

Однако при включении питания (и в случае больших изменений окружающей среды) мост редко бывает сбалансирован из-за незначительных изменений процесса, и его электрический уровень отражает либо «Min», либо «Max» значение для каждого пикселя в массиве. Необходимо сбалансировать напряжение пикселей путем подачи «компенсационного» тока. Это действие называется «компенсация». Компенсация выполняется на системном уровне каждого пикселя [2].

На рисунке 2 представлен мост Уинстона. Мост состоит из четырех резисторов два резистора термически замкнуты, их температура соответствует температуре корпуса болометра. Два других резистора (пикселя) представляют собой

термически изолированные мембраны. Один пиксель («активный») расположен в центре матрицы и постоянно подвергается облучению. Изолированный пиксель от подложки, экранирован от любого излучения, и поэтому называется «слепым».

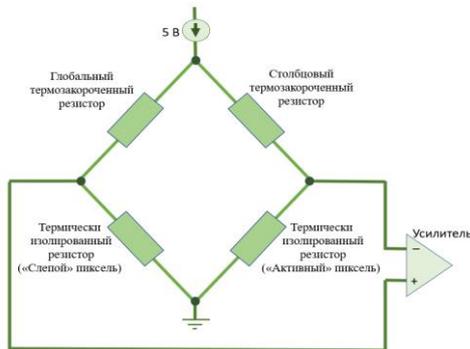


Рисунок 2 – Мост Уинстона для микроболметра

«Слепой» пиксель ряда предназначен для компенсации динамического поведения активного пикселя. Поэтому он изолирован от излучения и электрически подключен только во время считывания конкретной строки. Таким образом, мост включает в себя две разные пары болометров, но каждая из них полностью согласована и воспринимает одинаковое излучение. Таким образом, выходной сигнал является функцией разности температур «активного» пикселя от излучения.

Основная концепция компенсации заключается в сканировании всего массива и выборе соответствующей комбинации, которая поместит каждый пиксель в среднюю область динамического диапазона напряжений.

Алгоритм процедуры калибровки чувствительности микроболметров основан на принципе приведения выходных данных каждого пикселя к желаемому целевому значению путем изменения соответствующего значения Most Significant Bit (MSB) (наиболее значащего бита) и Least Significant Bit (LSB) (наименьшего значащего бита) компенсации.

На каждой итерации назначается новое значение компенсации. Комбинация битов назначается в соответствии с логической схемой, запрограммированной на системном уровне. Основная задача - сведение значений каждого пикселя к целевой зоне. Целевая зона в основном определяется настройками усиления (GAIN). Усиление – это параметр, который определяет, насколько сигнал, получаемый от микроболметра, усиливается перед его обработкой. В микроболметрах, которые используются для измерения теплового излучения, GAIN может влиять на чувствительность

устройства. Чем выше значение GAIN, тем более чувствительным становится прибор, что позволяет ему обнаруживать более слабые изменения температуры. Однако слишком высокое значение GAIN может привести к перегрузке сигнала и искажению данных.

В алгоритме калибровки используются следующие шаги:

1. Инициализация значений MSB и LSB. Выбранное значение старшего бита нельзя менять при дальнейшей настройке.
2. Считывание значения каждого пикселя. Начальное состояние отображает текущую выходную мощность пикселя.
3. Определение целевой зоны: задается желаемая выходная мощность. Этого можно достичь, выбрав определенный диапазон напряжения.
4. Обновление состояния пикселя: вычисленное значение MSB и LSB применяется к пикселю, изменяя его выходной сигнал до тех пор, пока он не достигнет желаемой целевой зоны.
5. Этот процесс повторяется для всех пикселей в матрице датчиков, гарантируя, что выходной сигнал каждого пикселя соответствует заданному целевому значению.

В результате чего получается «однородный» массив с небольшим рассеянием (рисунок 3). Это комплексный процесс, который обеспечивает точность и надежность измерений, а также помогает выявить и устранить возможные источники ошибок.

2958	2962	14834	3142
2761	13868	2959	4592
2738	16104	16100	3141
2856	2866	2691	14439
14199	12795	14412	2885
2832	2857	3167	9145
13736	2913	13853	2965
Компенсация			
16551	17184	16778	16200
16863	16108	16290	15989
16144	16784	15745	16082
15788	16169	15698	15855
16408	16733	16020	16843
16828	17236	16802	17459
15771	16857	17003	16547

Рисунок 3 – Значения части массива пикселей до и после компенсации

Литература

1. Evan Smith, Vanadium Oxide Microbolometers with Patterned Gold Black or Plasmonic Resonant Absorbers. – Florida, 2015 –168 p.
2. Le, Yu. Status of Uncooled Infrared Detector Technology at ULIS / Le Yu // Defence Science Journal. – 2013. – V. 63, № 6. – P. 545–549.

УДК 621.382.049.77

**ДИАГНОСТИКА КАЧЕСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ
СОВРЕМЕННЫХ ДАТЧИКОВ И СИСТЕМ**

Кудина А. В.¹, Васильева А. А.¹, Леонович А. Н.¹, Габец В. Л.²

¹Белорусский Государственный университет информатики и радиоэлектроники

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Современные методы диагностики ИС включают как автоматизированные системы, так и продвинутое технологии, которые обеспечивает создание сложных микросхем с минимальными дефектами.

Ключевые слова: тестеры, микроскоп, литографии, зондовая литография, рентгеновские микроанализаторы.

DIAGNOSTICS OF THE QUALITY OF INTEGRATED CIRCUITS USING MODERN SENSORS AND SYSTEMS

Kudina A.¹, Vasiljeva A.¹, Leonovich A.¹, Gabets V.²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Annotation. Modern methods of diagnostics of integrated systems include both automated systems and advanced technologies that ensure the creation of complex chips with minimal defects.

Keywords: testers, microscope, lithographs, probe lithography, X-ray microanalysts.

Адрес для переписки: Кудина А. В. ул. П.Бровки, 6, г. Минск 220013, Республика Беларусь

e-mail: kanc@bsuir.by

Современное общество невозможно представить без электронных устройств, функционирование которых зависит от интегральных микросхем. Качество и работа этих микросхем влияют на надежность, эффективность, энергопотребление, тепловыделение и другие характеристики устройств. Для обеспечения высокой надежности интегральных микросхем необходимо осуществлять контроль качества и проводить анализ причин их отказов, что позволит улучшить и корректировать технологии их производства.

Контроль качества интегральных микросхем (ИС) играет ключевую роль на всех этапах производства и сборки электронных устройств. Виды контроля варьируются в зависимости от этапа технологического процесса и объема проверяемой продукции, а также требуют современных методов и инструментов диагностики.

Контроль ИС делится на несколько видов: операционный (на этапе производства), выходной (перед завершением процесса) и входной (на сборочных предприятиях). Входной контроль основан на методах, регламентируемых нормативно-технической документацией (НТД), и направлен на обеспечение безопасности и работоспособности ИС. В современных условиях особое внимание уделяется неразрушающим методам тестирования, которые позволяют оценить электрические параметры без повреждения изделия.

С ростом объемов проверки ИС возникает необходимость в автоматизации процессов контроля. Для этого используются тестеры и измери-

тельно-вычислительные комплексы (ИВК), которые помогают эффективно проводить тестирование в соответствии с установленными стандартами. Применяются как параметрические тесты для микросхем с малой интеграцией, так и функциональные тесты для более сложных схем. Для гибридных ИС эффективно использование диагностического контроля, который может выявить и заменить поврежденные элементы [1].

При производстве ИС активно используется оптическая литография, которая сохраняет лидирующие позиции до достижения размеров в 100 нм. Однако для более мелких структур (менее 100 нм) применяются альтернативные методы, такие как электронная, ионная и рентгеновская литографии. В последние годы внимание уделяется развитию сканирующей зондовой литографии (СЗЛ), основанной на технологиях сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), что позволяет работать на наноуровне и создавать сложные структуры.

Метод использования атомно-силового микроскопа (АСМ) имеет два основных направления: панорамный анализ изображений поверхности и модификация поверхности.

Панорамный анализ предполагает исследование поверхности для измерения таких характеристик, как линейные размеры и форма микроструктур, например, шероховатость и неровности. Это позволяет контролировать рельефные структуры в микро- и нанoeлектронике.

Пример отсканированной схемы 100×100 мкм представлен на рисунке 1.

Модификация поверхности может быть механической и электрической. В первом случае модификация включает два метода: царапанье, при котором материал удаляется с поверхности, и перенос частиц, которые приклеиваются к острию и перемещаются. Во втором случае модификация происходит под воздействием импульсов напряжения, вызывая физические или химические изменения материала. Для механической обработки используются твердые острия, а для электрической – проводящие. Последний метод предпочтителен, так как позволяет работать с кремнием, не создавая значительных изменений в топографии поверхности [1].

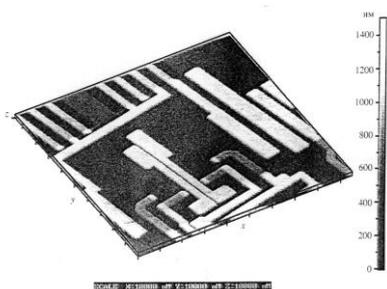


Рисунок 1 – Топографическое изображение ИС

Сканирующая зондовая микроскопия СЗМ является одним из самых передовых методов диагностики, который позволяет исследовать морфологию и локальные свойства поверхностей с высоким разрешением. Этот метод открыл путь к разработке множества новых инструментов, таких как атомно-силовой (АСМ), магнитно-силовой (МСМ), электросиловой (ЭСМ) микроскопы и ближнепольный оптический микроскоп (БОМ). Все эти приборы работают по схожим принципам и позволяют изучать как органические, так и неорганические материалы на микронных и субмикронных уровнях.

В сканирующих зондовых микроскопах для изучения микрорельефа и локальных свойств поверхности используются специальные игловидные зонды. Работа этих микроскопов основывается на взаимодействии зонда с поверхностью. Исполнительный элемент регулирует расстояние до поверхности, пока сигнал обратной связи не станет равным нулю. Обработанный компьютерной системой сигнал позволяет построить изображение рельефа поверхности $Z = f(x,y)$ с помощью

графики. Зондовые микроскопы также позволяют исследовать различные свойства поверхности, включая механические, электрические, магнитные и оптические [1].

Растровые электронные микроскопы (РЭМ) и рентгеновские микроанализаторы являются ключевыми инструментами для диагностики ИС. Они позволяют детально изучать структуру и свойства материалов, генерируя сигналы, такие как вторичные электроны, отраженные электроны и рентгеновское излучение. Эти данные предоставляют информацию о составе, топографии поверхности и кристаллической ориентации исследуемого объекта, что критично для оценки качества интегральных схем.

В растровом электронном микроскопе (РЭМ) основное внимание уделяется сигналам вторичных и отраженных электронов, которые изменяются в зависимости от топографии поверхности при сканировании образца. Вторичная электронная эмиссия, возникающая вблизи места попадания электронного луча, позволяет получать изображения с высоким разрешением благодаря большой глубине фокуса и контрасту рельефа. Также возможны другие полезные типы сигналов.

В рентгеновском микроанализаторе (РМА), известном как электронный микрозонд, важным является характеристическое рентгеновское излучение, возникающее под действием электронного пучка. Анализ этого излучения предоставляет качественную и количественную информацию о областях образца диаметром в несколько микрометров [1].

Контроль качества интегральных микросхем (ИС) важен на всех этапах производства для обеспечения надежности и предотвращения дефектов. Современные методы диагностики ИС включают как автоматизированные системы, так и продвинутые технологии нанолитографии и микроскопии. Развитие таких технологий, как СЗМ и СЗЛ, а также использование растровых и рентгеновских микроскопов, позволяет достигать высоких результатов в контроле качества и надежности ИС, обеспечивая создание сложных микросхем с минимальными дефектами.

Литература

1. Потапов, Л. А. Методы и средства контроля аналоговых микросхем: уч. пособие / Л. А. Потапов, В. Ф. Зотин. – Брянск: БГТУ, 2016. – 52 с.

УДК 621.382.2

ВЛИЯНИЕ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СЛОЕВ СИЛИЦИДОВ Pt–NiЛапицкая В. А.^{1,2}, Насевич А.А.¹, Довгаль М. И.¹, Потонейко А.В.¹, Щербакова Е. Н.¹, Соловьев Я. А.³¹Белорусский национальный технический университет²Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси³ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Объектом исследования является покрытие Pt–Ni, полученное магнетронным распылением и подвергнутое быстрой термической обработке, а также исследование его. В результате исследования было установлено, что шероховатость поверхности увеличивается с увеличением температуры от 350 до 450 °С, размер зерен и удельная поверхностная энергия так же увеличиваются.

Ключевые слова. покрытия Pt–Ni, быстрая термическая обработка, исследование микроструктуры.

EFFECT OF RAPID HEAT TREATMENT ON THE MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF Pt - Ni SILICIDE LAYERSLapitskaya V.^{1,2}, Nasevich A.¹, Dovgal M.¹, Scherbakova E.¹, Potoneiko A.¹, Soloviev Ya.³¹Belarusian National Technical University²GNU "Institute of Heat and Mass Transfer named after A.V. Lykov NAS of Belarus"IJSC INTEGRAL is the management company of the INTERAL holding
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The object of the study is a Pt–Ni coating obtained by magnetron sputtering and subjected to rapid heat treatment and study of microstructures. As a result of the study, it was found that the surface roughness increases with a change in temperature from 350 to 450 °С, the grain size and specific surface energy also change.

Keywords: Pt–Ni coatings, rapid heat treatment, microstructure study.

Адрес для переписки: Щербакова Е. Н., ул. Я. Коласа, 22, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: scherbakova@bntu.by

Введение. Микроэлектроника – современное направление электроники, включающее исследование, конструирование и производство интегральных схем (ИС) и радиоэлектронной аппаратуры на их основе [1].

Следует подчеркнуть, что в микроэлектронике широко применяется быстрая термическая обработка (БТО), т. к. БТО является одним из ключевых методов модификации материалов, позволяет улучшить их характеристики, такие как твердость, электрическая проводимость, коррозионная стойкость и т. д.

Тонкие пленки, сформированные с помощью быстрой термической обработки, находят применение в различных областях, включая авиационную и космическую промышленность, а также в производстве полупроводников [2].

Методы и материалы. Объектом исследования являются пленки Pt–Ni после быстрой термической обработки [3].

Пленки Ni–Pt–V толщиной 40 нм наносили на кремниевые подложки магнетронным распылением мишени из сплава Ni (77 масс.%) Pt (18 масс.%) V (5 масс.%) в среде аргона чистотой 99,993 % при давлении 0,8 Па и мощности разряда 1,0 кВт (плотность мощности составила около 2,7 Вт/см² при напряжении разряда 300 В) на установке 01НИ-7-015 (НИИ точного машино-

строения, Российская Федерация). Кремниевые подложки представляли собой эпитаксиальные слои легированного фосфором кремния с удельным сопротивлением 0,5 Ом·см и толщиной 5 мкм, сформированные на подложках монокристаллического кремния р- типа с удельным сопротивлением 0,005 Ом·см и ориентацией (111).

Далее подложки подвергали быстрой термической обработке в режиме теплового баланса путем облучения обратной стороны подложек некогерентным световым потоком кварцевых галогенных ламп постоянной мощности в среде азота в течение 7 с до достижения температуры от 350 до 500 °С на установке JetFirst 100 (Jipelec Qualiflow, France). Контроль температуры рабочей стороны подложки осуществлялся термопарой с точностью ±0,5 °С.

Морфологию поверхности пленок Pt–Ni, силу адгезии F_{ad} и удельную поверхностную энергию исследовали на атомно-силовом микроскопе Dimension FastScan (Bruker, США) в режиме PeakForce Tapping QNM (Quantitative Nanoscale Mechanical Mapping). Использовались кремниевые кантилеверы типа CSG10_SS (TipsNano, Российская Федерация) с жесткостью консоли 0,5 Н/м и радиусом острия 5 нм.

Результаты и их обсуждение. Структура поверхности под воздействием быстрой термической обработки от 350 до 500 °С значительно изменяется.

При температуре 350 °С структура поверхности, представленная на рисунке 1, состоит из зерен, собранных в конгломераты округлой формы. Возрастание температуры до 500 °С приводит к сглаживанию поверхности, представленной на рисунке 2, и частичному исчезновению конгломератов и уменьшению размеров оставшихся.

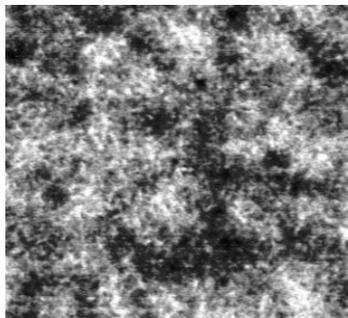


Рисунок 1 – АСМ-изображение (размер поля 1×1 мкм) поверхности покрытия после БТО при 350 °С

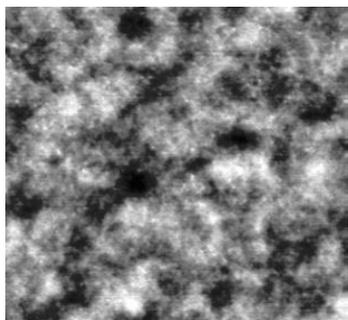


Рисунок 2 – АСМ-изображение (размер поля 1×1 мкм) поверхности покрытия после БТО при 500 °С

Размер зерен при температуре 350 и 500 °С равен 15,7 нм и незначительно уменьшается до 15,3 нм при 400 °С, но наблюдается значительное увеличение зерен до 17,6 нм при 450 °С, данные представлены на рисунке 3.

Увеличение удельной поверхностной энергии с повышением температуры быстрой термической обработки связано с увеличением размера зерна. Установлена корреляция между удельной поверхностной энергией и размером зерна в интервале температур 400–450 °С.

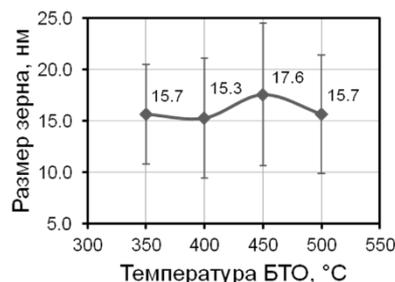


Рисунок 3 – Размер зерен после БТО от 350 до 500 °С

Сила адгезии и удельная поверхностная энергия представлены на рисунке 4 и увеличиваются с увеличением температуры с 2,23 до 2,47 нН и с 0,071 до 0,079 Н/м соответственно.

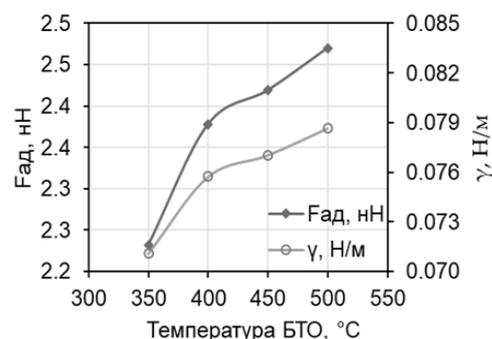


Рисунок 4 – Сила адгезии и удельная поверхностная энергия поверхности покрытий

Заключение. В результате исследования было установлено, что структура поверхности значительно изменяется с увеличением температуры от 350 до 450 °С, размер зерен и удельная поверхностная энергия увеличиваются.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ, проект № T23MЭ-010.

Литература

1. Вавилов, В. Д. Микросистемные датчики физических величин / В. Д. Вавилов, С. П. Тимошенко, А. С. Тимошенко. – Москва: Техносфера, 2018. – 550 с.
2. Пилипенко, В. А. Быстрые термообработки в технологии СБИС / В. А. Пилипенко. – Мн.: БГУ, 2004. – 531 с.
3. Структура и физико-механические свойства пленок Ni-Pt-V на кремнии после быстрой термической обработки. / В. А. Лапицкая [и др.] // Приборостроение-2023: материалы 16-й Международной научно-технической конференции, – Минск : БНТУ, 2023. – С. 419–420.

УДК 681.2.082

ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОГО ФОРМИРОВАНИЯ В РАЗРАБОТКЕ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ

Реутская О. Г., Таратын И. А.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Совершенствование процессов микромеханической обработки материалов для создания компонентов газовых сенсоров приводит к необходимости использования высокоточных лазерных установок. Изготовлены газовые сенсоры на подложках пористого оксида алюминия с применением технологии лазерного формирования. В качестве газочувствительного слоя выбран состав $\text{In}_2\text{O}_3+\text{Ga}_2\text{O}_3$ в среде HNO_3 . Получена вольт-амперная характеристика представленного сенсора. При воздействии спирта во время регистрации сигнала наблюдаются различные механизмы срабатывания: каталитический и полупроводниковый.

Ключевые слова: газовый сенсор, лазерное формирование, полупроводниковый слой.

LASER FORMING TECHNOLOGY IN GAS SENSORS DEVELOPMENT

Reutskaya O., Taratyn I.

Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Improvement of micromechanical processing of materials for creating components of gas sensors leads to the need to use high-precision laser installations. Gas sensors on porous aluminum oxide substrates are manufactured using laser formation technology. The composition $\text{In}_2\text{O}_3+\text{Ga}_2\text{O}_3$ in the HNO_3 medium is selected as a gas-sensitive layer. The volt-ampere characteristic of the presented sensor is obtained. When exposed to alcohol during signal recording, various response mechanisms are observed: catalytic and semiconductor.

Key words: gas sensor, laser formation, semiconductor layer.

Адрес для переписки: Реутская О. Г., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: oreutskaya@bntu.by.

Для создания широкой номенклатуры компонентов электронной техники и микромеханических датчиков используют многостадийные технологические процессы, которые включают подготовку и обработку материалов, разработку новых технологических процессов, моделирование конструкций и создание макетов, экспериментальных образцов и изготовление опытных образцов изделий. Применение прецизионных методов лазерной обработки материалов для электронной техники позволяет актуализировать МЭМС-технологии для создания нового поколения датчиков и систем широкого диапазона использования в промышленности, решения вопросов национальной и экологической безопасности, развития биотехнологии и защиты населения от опасных факторов окружающей среды. Учитывая жесткие требования по предъявляемым требованиям к МЭМС-датчикам и системам на их основе, требуемые технические характеристики разрабатываемых устройств могут быть обеспечены только с применением соответствующих материалов (кремний, пористый оксид алюминия, ситалл и др. материалы). Чувствительные элементы представляют собой тонкие подложки и мембраны со сложными вариантами конструкций [1].

На подложках из пористого оксида алюминия с применением технологии лазерного формирования были получены образцы чувствительных элементов газовых сенсоров, один из которых представлен на рисунке 1.

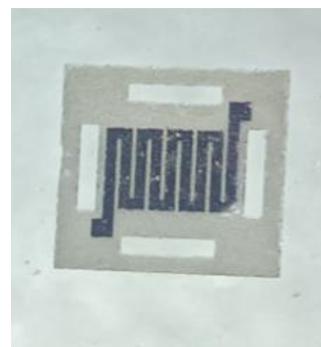


Рисунок 1 – Образец чувствительного элемента газового сенсора на подложке пористого оксида алюминия

Чувствительный элемент представляет собой кристалл размером $1,2 \times 1,2 \text{ мм}^2$ из оксида алюминия с пористостью 40 % и толщиной 60 мкм (рисунок 1). На поверхности пластины располагается нагреватель из тугоплавкого металла. В области нагревательного элемента сформированы отверстия, которые позволяют снизить тепловые потери и потребляемую мощность сенсора [2].

Чувствительный элемент был получен в процессе лазерной обработки пластины пористого оксида алюминия, сформирована топология чувствительного элемента и сквозная перфорация в виде «окон» вдоль нагревательного элемента. Затем чувствительный элемент по средствам гибкой связи закрепили в корпус методом контактной

сварки и нанесли газочувствительный полупроводниковый слой.

В качестве газочувствительного слоя применялся состав $\text{In}_2\text{O}_3 + \text{Ga}_2\text{O}_3$ в среде HNO_3 , полученный золь-гель методом. Активный слой сформировался на двух сторонах чувствительного элемента. Для стабилизации поверхности полученного чувствительного элемента был проведен отжиг при мощности 220 мВт. На «рисунке 2» представлен внешний вид сенсора без газопроницаемого колпака со сформированным газочувствительным слоем.



Рисунок 2 – Чувствительный элемент газового сенсора с полупроводниковым газочувствительным слоем, закрепленный гибкой связью

После формирования и стабилизации газочувствительного слоя получена вольт-амперная характеристика газового сенсора (рисунок 3).

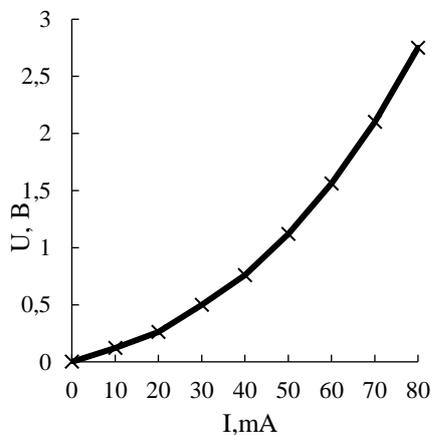


Рисунок 3 – Вольт-амперная характеристика газового сенсора с полупроводниковым газочувствительным слоем

Стабилизация газочувствительного слоя осуществлялась при воздействии тока $I = 71$ мА

и напряжении $U = 2,2$ В в течение 96 часов. Затем были проведены измерения выходного сигнала сенсора при различной мощности.

Сигнал и его быстродействие определялись по воздействию паров спирта. Время срабатывания при мощности потребления 50–100 мВт не превышало 5 с. Возврат значения напряжения в первоначальное состояние происходил медленно в течение 4–5 мин.

Установлено, что при мощностях 100–158 мВт наблюдается катализ при воздействии паров спирта. После повторения длительного отжига наблюдается повторение сигнала каталитического типа. Исследования проводились для 7 образцов, изготовленных методом лазерного формирования.

Полученные в результате исследований результаты могут быть определены рядом факторов, в том числе особенностью активации поверхности сенсора после лазерной обработки [1].

Предложенные сенсоры отличаются стабильностью сигналов во времени. На их основе будут построены газовые микросистемы для обнаружения горючих и токсичных газов.

Разработка газовых сенсоров с применением лазерной обработки позволяет создавать сверхтонкие элементы конструкции сложной топологии в одном технологическом процессе с возможностью воспроизведения нескольких однотипных элементов.

С использованием лазерной установки на одной технологической подложке можно изготавливать как несколько объектов с различающимися элементами конструкции, так и однотипные серии устройств. Такой подход к технологии приводит не только к техническим преимуществам, но и значительным экономическим выгодам в части изготовления датчиков не только в мелкосерийном производстве, но и возможности внедрения в серийное производство.

Литература

1. Лазерная микрофрезеровка в мелкосерийном производстве металлооксидных датчиков на основе керамических мембранных структур по МЭМС-технология / Н. Н. Самоаев [и др.] // Датчики и системы. – 2019. – № 5. – С. 54–58.
2. Реутская, О. Г. Мультисенсорная микросистема для измерения концентрации газов CO , H_2 , C_3H_8 , CO_2 / О. Г. Реутская, И. А. Таратын, Ю. М. Плескачевский // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 3. – С. 271–278.

УДК 621.3.049

УЗЛЫ И СИСТЕМЫ ВАКУУМНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ SNT SIGMA-400V

Сапожникова К. С.¹, Щербакова Е. Н.², Наливайко О. Ю.¹

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕРАЛ»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлен основной состав узлов и систем вакуумно-технологического оборудования.

Ключевые слова: вакуумно-технологическое оборудование, подложка.

UNITS AND SYSTEMS OF VACUUM TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

Sapozhnikova K.¹, Shcherbakova E.², Nalivayko O.¹

¹JSC INTEGRAL is the management company of the INTERAL holding

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The main composition of units and systems of vacuum technological equipment is presents.

Key words: vacuum technological equipment, substate.

Адрес для переписки: Щербакова Е. Н., ул. Я. Коласа, 22, г. Минск 220113, Республика Беларусь

e-mail: scherbakova@bntu.by

Установка SNT Sigma-400V представляет собой вакуумно-технологическое оборудование (ВТО) периодического действия со шлюзовой загрузкой.

Установка оснащается сухими механическими насосами для предварительной откачки, системой высоковакуумной откачки на турбомолекулярном насосе и криопанели или крионасосе.

ВТО имеет в составе следующие основные узлы и системы:

1. Модуль загрузки;
2. Пост вакуумный;
3. Система откачки;
4. Транспортная система;
5. Технологические устройства;
6. Система нагрева;
7. Система охлаждения;
8. Система газовая;
9. Система пневматическая;
10. Система электропитания и управления;
11. Система автоматического управления.

Модуль загрузки обеспечивает загрузку-выгрузку подложек в ручном и автоматическом режиме, возможность оперативной смены подложкодержателей для перехода на другой типоразмер подложек.

Модуль загрузки обеспечивает возможность работы с круглыми подложками диаметром до 200 мм и квадратными до 178×178 мм, толщиной от 100 мкм до 8 мм. Основные материалы подложек – кремний, стекло, кварц.

Модуль загрузки состоит из стола ручной загрузки-выгрузки (для удобства ручной загрузки и замены оснастки) и стола автоматической загрузки с системой роботизированной загрузки-выгрузки.

Каретка представляет собой жесткую рамку с круглой направляющей на нижней стороне, и

ферромагнитной направляющей сверху. Нижняя направляющая контактирует с профилированными роликами транспортной системы, верхняя удерживается блоками бесконтактной магнитной опоры. В технологической камере, верхняя и нижняя часть каретки защищена от запыления и воздействия плазмы.

Каретка стоит с наклоном 5–10 градусов для возможности установки подложек без дополнительного крепления. Угол наклона устанавливается при монтаже и настройке оборудования, и, при необходимости, может быть изменен в процессе эксплуатации.

На каретке устанавливается сменный держатель подложек и защита от запыления. Держатель подложек – легкоъемная сменная деталь, установленная на каретке. Представляет собой металлическую пластину с фрезерованными углублениями под подложки, и полимерными (полиимид, РЕЕК) вставками или покрытием, обеспечивающими отсутствие контакта с планарной поверхностью подложек в зоне за пределами 3 мм от краев с обеих сторон. Для каждого типа подложек разрабатывается свой держатель подложек.

Подложки могут загружаться вручную или автоматически. Режим загрузки задается с панели управления. Система автоматической загрузки построена на базе 6-координатного роботоманипулятора, и обеспечивает работу с подложками разного размера, подаваемыми в стандартных кассетах. Система обеспечивает безопасную и стабильную работу с утоненными пластинами (до 100 мкм) с коэффициентом боя не более 0,1 %.

При необходимости, может быть использована ручная загрузка. В режиме ручной загрузки, каретка выезжает на стол ручной загрузки-выгрузки, где может быть произведена

замена держателя подложки и/или загрузка-выгрузка подложек.

Пост вакуумный обеспечивает размещение узлов и систем ВТО, целостность конструкции, возможность перемещения и транспортировки ВТО без потери работоспособности. Пост вакуумный состоит из камеры шлюзовой, технологической камеры очистки, технологической камеры нанесения покрытий, каркаса с обшивками.

Технологическая камера очистки предназначена для подготовки подложек к нанесению покрытия.

Технологическая камера нанесения покрытий изготовлена из нержавеющей стали, внутренняя поверхность электрохимически полированная. Стенки камеры снабжены каналами водяного охлаждения. Оснащена легкосъемными съемными экранами, защищающими стенки камеры и технологические устройства от запыления, стойкими к воздействию растворов азотной, плавиковой и соляной кислоты. Каркас обеспечивает размещение камеры шлюзовой, технологической камеры очистки, технологической камеры нанесения покрытий, станций газовой и пневматической, элементов системы откачки и охлаждения, внутрикамерной оснастки, кабельных каналов для разводки коммуникаций. Для возможности локального перемещения и фиксации положения ВТО в производственном помещении каркас имеет колеса опорные и регулируемые опоры.

Система откачки обеспечивает создание разряжения в камере шлюзовой (низкий вакуум-НВ), в технологической камере очистки (высокий вакуум – ВВ) и в технологической камере нанесения покрытий, необходимого для проведения технологического процесса. Транспортная система предназначена для перемещения кареток с загруженными на них подложками с позиции модуля ручной или автоматической загрузки-ки/выгрузки в вакуумный пост и обратно. Рабочие параметры транспортной системы обеспечивают перемещение кареток с подложками по заданной программе в соответствии с выбранным рецептом напыления.

Нижняя направляющая каретки контактирует с профилированными роликами транспортной системы, верхняя удерживается блоками бесконтактной магнитной опоры. Это обеспечивает низкий процент привносимых дефектов на подложки. Вращение роликов обеспечивают сервоприводы посредством ременных передач. Для передачи вращения внутрь вакуумной части применяются вводы вращения с магнитожидкостным уплотнением. Напыление тонкопленочных структур производится в режиме сканирования подложек перед магнетроном, с последовательным включением магнетрона с требуемым материалом.

Технические устройства (система магнетронного распыления, система ВЧ очистки/травления)

расположены на передней крышке технологических камер имеют крепление, облегчающее осмотр и обслуживание. Система DC магнетронного распыления обеспечивает нанесение покрытий (до 5 материалов) путем распыления соответствующих мишеней. Состоит из 5 источников магнетронного распыления, расположенных сбоку от подложек. Имеет систему учета износа мишени по времени и мощности напыления.

Перед процессом напыления может производиться очистка подложек ВЧ источником. ВЧ источник обеспечивает финишную очистку поверхности подложек от молекулярных частиц, адсорбированных газов, органических и неорганических загрязнений, а также для активации поверхностных связей подложки непосредственно перед нанесением тонких пленок.

Система нагрева обеспечивает разогрев подложек до температуры 350°C с точностью не хуже $\pm 5^\circ\text{C}$ (разброс температура по касете/точность установки температуры).

Система нагрева реализована на основе ИК-нагревателей с предусмотренной защитой нагревателей от запыления кварцевыми съемными экранами. Равномерность нагрева обеспечивается расположением и направлением нагревателей. Мощность нагрева регулируется системой управления по показаниям термомпары, расположенной в зоне держателя подложек.

Система охлаждения обеспечивает охлаждение технологических камер, высоковакуумных насосов, магнетронов, ВЧ источника для поддержания рабочего температурного режима последних. Снабжена датчиком давления воды, реле протока и датчиком температуры. Реле протока служит для аварийного отключения ВТО в случае нарушений в системе циркуляции воды. Подача воды к потребителям осуществляется автоматически. Подключается к сети охлаждения или замкнутой рециркуляции. Рабочее давление на входе системы – 4–8 bar, температура – 18–28 °C.

Система газовая обеспечивает подачу технологических газов непосредственно в технологическую камеру и ВЧ источник очистки. Система подачи технологических газов построена на регуляторах расхода газов, и позволяет подавать до 4-х различных газов (аргон, азот, кислород, резерв). Давление технологических газов, подаваемых на вход системы газовой – 2–4 bar. Потоки газа из газовой магистрали подаются на входные порты с фильтрующими элементами. Через входной порт газ по металлическим трубопроводам через клапан поступает на регулятор давления, на котором задается необходимое рабочее давление. Далее технологический газ поступает на исполнительные элементы системы подачи газов.

Система пневматическая обеспечивает регулирование входного давления и подачу сжатого

воздуха к исполнительным элементам ВТО: клапанам вакуумным, затворам высоковакуумным и т. д. Конструктивно обеспечена возможность подключения к системе подачи сжатого воздуха. Рабочее давление на входе системы – 4–10 bar.

Система электропитания и управления обеспечивает электрическое питание узлов и систем ВТО, имеет в составе промышленный компьютер, электрическую панель, источник бесперебойного питания, блока питания техно-

логических устройств, промышленный контроллер, устройства и элементы коммутации.

Система автоматического управления обеспечивает цифровое и аналоговое управление узлами и системами ВТО (насосами, клапанами, блоками питания, технологическими устройствами, системой охлаждения, пневматической и т. д.), обеспечивает автоматический вывод ВТО на рабочий режим и работу ВТО по требуемому технологическому процессу.

УДК 621.3.049

**ВАКУУМНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ СЛОЕВ Ti, Ni, Ag, Cr, Cr₂O₃**
Сапожникова К. С.^{1,2}, Наливайко О. Ю.¹, Щербакова Е. Н.²

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕРАЛ»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлен основной состав технологических устройств и подложки для проведения процесса на вакуумно-напылительной установке.

Ключевые слова: вакуумно-технологическое оборудование, кремниевая подложка, стеклянные пластины, напыление.

VACUUM TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR SPUTTERING LAYERS OF Ti, Ni, Ag, Cr, Cr₂O₃
Sapozhnikova K. S.^{1,2}, Nalivaiko O. J.¹, Shcherbakova E. N.²

¹JSC INTEGRAL is the management company of the INTERAL holding

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The main composition of technological devices and substrates for carrying out the process on a vacuum sputtering equipment.

Key words: vacuum technological equipment, silicon substrate, glass wafers, sputtering.

Адрес для переписки: Щербакова Е. Н., ул. Я. Коласа, 22, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: scherbakova@bntu.by

Для проведения процесса физического осаждения из газовой фазы (напыление) используют пленки Ti, Ni, Ag (для изготовления интегральных схем), Cr и Cr₂O₃ (для изготовления фотошаблонов) [1].

Для напыления этих пленок используют установку SNT Sigma-400V, которая представляет собой вакуумно-технологическое оборудование (ВТО) периодического действия со шлюзовой загрузкой.

Установка оснащается сухими механическими насосами для предварительной откачки, системой высоковакуумной откачки на турбомолекулярном насосе и криопанели или крионасосе.

ВТО применяется для нанесения прецизионных оптических покрытий, металлизации и барьерных покрытий в микроэлектронике.

Модуль загрузки обеспечивает загрузку-выгрузку подложек в ручном и автоматическом режиме, позволяет оперативно сменять подложкодержатели для перехода на другой типоразмер подложек и обеспечивает возможность работы с

круглыми подложками диаметром от 100 до 200 мм и квадратными до 178×178 мм. толщиной от 100 до 625 мкм, а стеклозаготовок – до 8 мм. Основные материалы подложек – кремний, стекло, кварц.

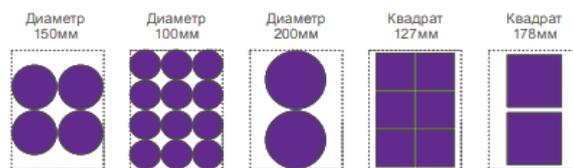


Рисунок 1 – Держатель для подложек различного диаметра

Подложки могут загружаться вручную или автоматически. Режим загрузки задается с панели управления.

Держатель подложек представляет собой металлическую пластину с фрезерованными углублениями под подложки, и полимерными (полиимид, полиэфирэфиркетон) вставками или покрытием, бес-

печивающими отсутствие контакта с планарной поверхностью подложек в зоне за пределами 3 мм от краев с обеих сторон. Для каждого типа подложек используется свой держатель подложек.

Держатель устанавливается на каретку. Каретка изначально перемещается в шлюзовую камеру, затем продвигается в технологическую камеру очистки, в окончании перемещается в технологическую камеру нанесения покрытий.

Система автоматической загрузки построена на базе 6-координатного робота-манипулятора, и обеспечивает работу с подложками разного размера, подаваемыми в стандартных кассетах. Система обеспечивает безопасную и стабильную работу с утоненными пластинами (до 100 мкм) с коэффициентом боя не более 0,1 %. При необходимости может быть использована ручная загрузка. В режиме ручной загрузки, каретка выезжает на стол ручной загрузки-выгрузки, где может быть произведена замена держателя подложки и/или загрузка-выгрузка подложек.

Шлюзовая камера оснащена системой откачки, напуска. Камера отсекается от атмосферы и от технологической камеры очистки щелевыми затворами.

Технологическая камера очистки предназначена для подготовки подложек к нанесению покрытия.

Технологическая камера нанесения покрытий изготовлена из нержавеющей стали, внутренняя поверхность электрохимически полированная. Стенки камеры снабжены каналами водяного охлаждения.

Напыление тонкопленочных структур производится в режиме сканирования подложек перед магнетроном, с последовательным включением магнетрона с требуемым материалом.

Пост вакуумный обеспечивает размещение узлов и систем ВТО, целостность конструкции, возможность перемещения и транспортировки ВТО без потери работоспособности.

Система откачки обеспечивает создание разрежения в камере шлюзовой (низкий вакуум), в технологической камере очистки (высокий вакуум) и в технологической камере нанесения покрытий (низкий вакуум), необходимого для проведения технологического процесса.

Транспортная система предназначена для перемещения кареток с загруженными на них подложками с позиции модуля ручной или автоматической загрузки/выгрузки в вакуумный пост и обратно.

Нижняя направляющая каретки контактирует с профилированными роликами транспортной системы, верхняя удерживается блоками бесконтактной магнитной опоры. Это обеспечивает низкий процент привносимых дефектов на подложки.

Система магнетронного распыления обеспечивает нанесение покрытий (до 5 материалов) путем распыления соответствующих мишеней (Ti, Ni, Ag, Cr, Cr₂O₃ и др.). Состоит из 5 источников

магнетронного распыления, расположенных сбоку от подложек. Имеет систему учета износа мишени по времени и мощности напыления. Обеспечивает следующие скорости напыления:

- Al : > 700 Å/мин;
- Ti : > 400 Å/мин;
- Ni : > 350 Å/мин.

Разброс значений измеряемого параметра (не более):

- ±5 % по подложке;
- ±5 % по подложкодержателю.

Перед процессом напыления может производиться очистка подложек ВЧ источником. ВЧ источник обеспечивает финишную очистку поверхности подложек от молекулярных частиц, адсорбированных газов, органических и неорганических загрязнений, а также для активации поверхностных связей подложки непосредственно перед нанесением тонких пленок.

Система нагрева обеспечивает разогрев подложек до температуры 350 °С с точностью не хуже ±5 % (разброс температура по кас-сете/точность установки температуры).

Система нагрева реализована на основе ИК-нагревателей с предусмотренной защитой нагревателей от запыления кварцевыми съемными экранами. Равномерность нагрева обеспечивается расположением и направлением нагревателей. Мощность нагрева регулируется системой управления по показаниям термодары, расположенной в зоне держателя подложек.

Система охлаждения обеспечивает охлаждение технологических камер, высоковакуумных насосов, магнетронов, ВЧ источника для поддержания рабочего температурного режима последних. Снабжена датчиком давления воды, реле протока и датчиком температуры. Реле протока служит для аварийного отключения ВТО в случае нарушений в системе циркуляции воды. Подача воды к потребителям осуществляется автоматически. Подключается к сети охлаждения или замкнутой рециркуляции.

Система газовая обеспечивает подачу технологических газов непосредственно в техно-логическую камеру и ВЧ источник очистки. Система подачи технологических газов построена на регуляторах расхода газов, и позволяет подавать до 4-х различных газов (аргон, азот, кислород и др.). Потоки газа из газовой магистрали подаются на входные порты с фильтрующими элементами. Через входной порт газ по металлическим трубопроводам через клапан поступает на регулятор давления, на котором задается необходимое рабочее давление. Далее технологический газ поступает на исполнительные элементы системы подачи газов.

Система пневматическая обеспечивает регулирование входного давления и подачу сжатого воздуха к исполнительным элементам: клапанам вакуумным, затворам высоковакуумным и т. д.

Система электропитания и управления обеспечивает электрическое питание узлов и систем ВТО.

Система автоматического управления обеспечивает цифровое и аналоговое управление узлами и системами ВТО (насосами, клапанами, блоками питания, технологическими устройствами, системой охлаждения, пневматической и т. д.), обеспечивает автоматический вывод ВТО на рабочий

режим и работу ВТО по требуемому технологическому процессу.

Литература

1. Мартынов, В. В. Технология сверхбольших интегральных схем и оптико-механическое оборудование для микро- и нанoeлектроники / В. В. Мартынов, Я. И. Точицкий. – Мн: Беларуская навука, 2018. – 467 с.

УДК 621.3.049

ВАКУУМНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ: НАЗНАЧЕНИЕ, ОСОБЕННОСТИ, УПРАВЛЕНИЕ

Сапожникова К. С.^{1,2}, Наливайко О. Ю.¹, Щербакова Е. Н.²

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕРАЛ»

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены назначение, особенности, управление и программное обеспечение вакуумно-технологического оборудования.

Ключевые слова: вакуумно-технологическое оборудование, напыление, автоматический режим, полуавтоматический режим, ручной режим, скорость напыления.

VACUUM TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR METAL SPRAYING. PURPOSE, FEATURES, MANAGEMENT

Sapozhnikova K. S.^{1,2}, Nalivaiko O. J., Shcherbakova E. N.²

¹JSC INTEGRAL is the management company of the INTERAL holding

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The purpose, features, management and software of vacuum technological equipment are considered.

Key words: vacuum technological equipment, sputtering, automatic mode, semi-automatic mode, manual mode, deposition rate.

Адрес для переписки: Щербакова Е. Н., ул. Я. Коласа, 22, г. Минск 220113, Республика Беларусь

e-mail: scherbakova@bntu.by

Вакуумное технологическое оборудование (ВТО) SNT Sigma-400V разработано на базе технических решений и компонентов типового производственного оборудования магнетронного распыления для обработки широкоформатных подложек в области микроэлектроники [1].

Оборудование с шлюзовой загрузкой, вертикальным расположением подложек, функциями ВЧ очистки, нагрева подложек до 350 °С перед напылением, магнетронного распыления до 5 материалов в одном процессе, предназначена для нанесения проводящих и оптических покрытий на стандартные и тонкие (до 100 мкм) кремниевые пластины диаметром 100 мм, 150 мм и 200 мм, а также стеклопластины для шаблонных заготовок размером 102×102 мм, 127×127 мм и 153×153 мм.

ВТО SNT Sigma-400V обеспечивает высокую эффективность и гибкость производства, быстрый переход с одного размера подложки на другой, возможность автоматической и ручной загрузки подложек. Предназначено для применения в серийном и мелкосерийном производстве.

К особенностям установки следует отнести следующее:

- простота загрузки-выгрузки подложек;
- сменные держатели подложек под разные размеры;
- система перемещения с бесконтактной верхней опорой обеспечивает низкую дефектность;
- загрузка подложек на атмосфере, с последующим перемещением держателя подложек без дополнительного механического воздействия на подложки;
- обеспечение высокой равномерности на широкоформатных подложках;
- программируемый профиль движения;
- до 5 материалов слоев в одном цикле напыления;
- 3 стандартных катода + 2 катода для магнитных материалов;
- коэффициент использования мишени 25–35% против обычных 8–15%;
- возможность ручной и автоматической загрузки-выгрузки подложек;
- высокая надежность установки;
- возможность работы в автоматическом, полуавтоматическом и ручном режимах.

Контроль параметров обеспечивается посредством соответствующих датчиков и элементов управления.

Программное обеспечение, установленное на встраиваемый компьютер, обеспечивает:

- надежную работу ВТО в автоматическом, полуавтоматическом и ручном режиме управления;
- удобный способ задания технологических режимов работы (рецептов технологии) для осуществления процессов вакуумной откачки, нагрева, очистки, напыления, термостабилизации, охлаждения, газонапуска в заданной последовательности в соответствии с заданными значениями технологических параметров;

- визуализацию основных параметров технологического процесса через русифицированный интерфейс оператора;

- сохранение рецептов процессов;

- вызов рецептов в процессе работы на ВТО;

- возможность редактирования рецептов и удаления рецептов при необходимости;

- возможность автоматического проведения процесса по выбранному рецепту;

- возможность установки защиты от несанкционированного доступа к управляющим программам;

- возможность протоколирования производимого технологического цикла напыления с фиксированием заданных и действительных технологических параметров по вакууму, ионно-плазменной очистке, нагреву–термостабилизации–охлаждению, напылению, напуску;

- возможность автоматического ведения и сохранения протоколов произведенных циклов напыления и распечатки на бумажный носитель;

- возможность автоматического ведения и сохранения журнала аварийных ситуаций.

Перед проведением процесса напыления проводят проверку скорости напыления. Методика проверки скорости напыления металлических пленок Ti, Ni проводится в неподвижном для кареток положении. Данная проверка производится по следующему алгоритму:

1. Выбрать подложки пластин любого диаметра;

2. Провести процесс напыления Ti – 4 минуты, Ni – 5 минут. За время проведения процесса создается ступенька;

3. Произвести контроль толщины на профилометре Alpha-step (диаметр пластин 100-150 мм) или Tencor HRP (диаметр пластин 200 мм) в 3 точках на вертикальной оси;

4. Рассчитать скорость напыления. Скорость напыления должна быть для Ti – более 300 Å/мин, для Ni – 240 Å/мин.

Проверки на скорость напыления металлической пленки Ag проводится в неподвижном для кареток положении. Производится по следующему алгоритму:

1. Выбрать подложки кремниевых пластин диаметром 200 мм любой марки;

2. Произвести контроль толщины на профилометре Tencor HRP в трех точках на одной оси;

3. Установить подложки с ориентацией оси измерения по вертикали;

4. Провести процесс напыления Ag в течение 1 минуты;

5. Произвести контроль толщины на профилометре Tencor HRP в 3 точках на вертикальной оси;

6. Рассчитать разность толщин до и после напыления и скорость напыления. Скорость напыления должна быть более 2400 Å/мин.

Методика проверки скорости напыления металлических пленок Cr и Cr₂O₃ проводится по следующему алгоритму:

1. Провести процесс нагрева до 120 °C и напыление Cr и Cr₂O₃ на стекло заготовки 102×102 мм или 127×127 мм;

2. Контроль оптической плотности на оборудовании ДНС-2;

3. Проконтролировать на матовом отражателе микроскопа МССО рабочую зону пластины на наличие видимых дефектов (протоколов) размером более 0,0015 мм.

Также после проведения процесса напыления проводят методику контроля дефектов.

Проверка на отсутствие дефектов и загрязнений поверхностей пластин и подложек на расстоянии более 3 мм от края с обеих сторон. Принцип проводится визуально.

Допускается:

1. цвет покрытия – серебристый с оттенками, зернистость слоя, зеркальные точки, связанные с внешним видом непланарной стороны после утонения;

2. несквозные царапины по слою серебра длиной менее 5 мм;

3. поверхностная потертость серебра шириной не более 5 мм и длиной не более 50 мм;

4. отдельные точки, пятна размером не более 2 мм в количестве не более 5 штук.

Не допускается:

1. отпечатки вакуумного столика;

2. отслоение металла;

3. отпечатки пальцев, загрязнения.

Проверка на привносимую дефектность частями проводится по следующему алгоритму:

1. Получить пластины диаметром 150 мм в количестве 8 штук.

2. Провести химическую обработку пластин и отдать на анализ 8 штук., на установке Tencor Surfscan.

3. Пластины в количестве 4 штук использовать в имитации процесса напыления. Имитация процесса представляет собой метод исследования, при котором изучаемый процесс проходит по полному циклу (по всем камерам) без очистки и напыления.

5. Провести анализ пластин, прошедших имитацию процесса напыления на установке Tencor Surfscan.

6. Оценить привносимую дефектность.

Таким образом, в данной работе рассмотрены назначение, особенности, управление и программное обеспечение вакуумно-технологического оборудования на примере SNT Sigma-400V.

Показаны возможности программного обеспечения, установленного на встроенный в ВТО компьютер. Приведены методики проверки скорости напыления металлических пленок Ti, Ni, а также

пленок Cr и Cr₂O₃. Показаны допустимые и недопустимые дефекты при проверке на отсутствие дефектов и загрязнений.

Литература

1. Мартынов, В. В. Технология сверхбольших интегральных схем и оптико-механическое оборудование для микро- и наноэлектроники / В. В. Мартынов, Я. И. Точицкий. – Минск : Беларуская навука, 2018. – 467 с.

УДК 681.586.7

ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СЛОИ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ЛЕНГМЮРА–БЛОДЖЕТТ ПОЛИВИНИЛКАРБАЗОЛА С НАНОЧАСТИЦАМИ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ ДАТЧИКОВ АНАЛИЗА СОДЕРЖАНИЯ КАТИОНОВ НИКЕЛЯ В ВОДЕ Сапсалёв Д. В.^{1,2}, Мельникова Г. Б.¹, Аксиучиц А. В.³, Баранова А. С.¹, Толстая Т. Н.¹, Котов Д. А.³, Чижик С. А.^{1,4}

¹Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси

²Белорусский государственный педагогический университет имени М. Танка

³Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

⁴Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработана методика формирования наноструктурированных чувствительных слоев на основе поливинилкарбазола с наночастицами диоксида кремния методом Ленгмюра–Блоджетт для встречно-штыревых никелевых электродов емкостного датчика анализа катионов никеля в воде. Установлено, что модификация проводящего никелевого слоя емкостного датчика полимерными наноконпозиционными пленками позволяет повысить стабильность работы емкостного датчика до 3 циклов измерений.

Ключевые слова: поливинилкарбазол, наноконпозиции, метод Ленгмюра–Блоджетт, емкостные датчики, атомно-силовая микроскопия.

SENSITIVE LAYERS BASED ON LANGMUIR–BLODGETT POLY(VINYLCARBAZOLE) FILMS WITH SILICON DIOXIDE NANOPARTICLES FOR SENSORS FOR ANALYSIS OF NICKEL CATIONS CONTENT IN WATER

Sapsaliou D.^{1,2}, Melnikova G.¹, Aksiuchyts A.³, Baranova A.¹, Tolstaya T.¹,
Kotov D.³, Chizhik S.^{1,4}

¹A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute NAS of Belarus

²Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank

³Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

⁴Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A method for forming nanostructured sensitive layers based on poly(vinylcarbazole) with silicon dioxide nanoparticles by the Langmuir–Blodgett method for interdigitated nickel electrodes of a capacitive sensor for analyzing nickel cations in water has been developed. It has been established that modification of the conductive nickel layer of the capacitive sensor with polymer nanocomposite films allows increasing the stability of the capacitive sensor to 3 measurement cycles.

Key words: poly(vinylcarbazole), nanocomposites, Langmuir–Blodgett method, capacitive sensors, atomic force microscopy.

Адрес для переписки: Сапсалёв Д. В., ул. П. Бровки, 15, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: dsapsalev@list.ru

Введение. Тонкопленочные покрытия на основе проводящих полимеров (полианилина, полипиррола, поливинилкарбазола и пр.) и их наноконпозитивов широко используются в различных отраслях науки и техники (фотоника, оптоэлектроника и пр.), в том числе при разработке химических сенсорных систем [1–3]. Метод Ленгмюра–Блоджетт (ЛБ) позволяет контролируемо получать покрытия нанометровой толщины на планарных подложках [1, 4].

Материалы и методы. В работе использован емкостный датчик встречно-штыревого типа, представляющий собой проводящий слой никеля заданной топологии, сформированный методом ионно-лучевого распыления (установка ВУ-1БСП, СССР) на ситалловой подложке [5].

Тонкопленочные покрытия на основе поливинилкарбазола (ПВК, Sigma-Aldrich, $M = 1100000$) формировали на поверхности датчика методом Ленгмюра–Блоджетт («Автоматизированный комп-

лекса для модифицирования поверхностей мембран молекулярными и ультратонкими слоями», Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Республика Беларусь). Поверхностное давление (π) формирования нанокомпозитов на основе ПВК определяли экспериментально на основе анализа изотерм сжатия монослоев. Установлено, что наиболее плотные однородные покрытия на основе ПВК формируются при $\pi = 15$ мН/м.

ЛБ-пленки ПВК формировали из его раствора в хлороформе с концентрацией 0,75 мг/мл. С целью получения структур, обладающих более развитой поверхностью, в состав полимерных покрытий вводили наночастицы диоксида кремния (SiO_2). Для этого раствор ПВК ($c = 1,5$ мг/мл) смешивали с суспензиями наночастиц SiO_2 (Sigma-Aldrich, $d = 10\text{--}20$ нм, $c = 0,5$ мг/мл и 1 мг/мл) в хлороформе, предварительно выдержанными в ультразвуковой ванне в течение 10 мин в объемном соотношении 1 : 1, после чего повторяли процедуру обработки ультразвуком в течение 5 мин. В результате были приготовлены рабочие суспензии, содержащие $6,11 \cdot 10^3$ моль и $12,22 \cdot 10^3$ моль SiO_2 из расчета на 1 моль ПВК.

Исследование структуры поверхности сформированных покрытий проводили методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на установке NT-206 (ОДО «Микротестмашины», Республика Беларусь) с использованием кремниевых кантилеверов NSC 11A (жесткость 3 Н/м, «MicroMash», Эстония).

Рабочие характеристики датчика определяли на основании анализа зависимости емкостных характеристик от частоты (измеритель иммитанса E7-25, Республика Беларусь) при выдерживании в растворах сульфата никеля (II) с различными концентрациями. Для определения стабильности работы сенсоров проводили серию измерений. За один цикл принято измерение емкостных характеристик датчика для растворов со следующими значениями концентраций NiSO_4 : $1 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-3}$, $1 \cdot 10^{-2}$, $1 \cdot 10^{-1}$, 1, 10, 50 мМ).

Результаты и их обсуждение. На основании данных АСМ установлено, что поверхность наноструктурированного проводящего покрытия никеля представлена равномерно распределенными зернами продолговатой формы. Максимальный размер отдельных зерен достигает 800 нм (рисунок 1, а). Исходный (немодифицированный полимерными покрытиями) датчик демонстрирует следующие рабочие характеристики: предел обнаружения ионов $\text{Ni}^{2+} - 10^{-3}$ мМ, стабильность в течение 1 цикла измерений [5].

Пленки Ленгмюра–Блоджетт поливинилкарбазола и нанокомпозиты состава ПВК– SiO_2 формируют на никеле плотные слои – поверхность металла закрыта монослоями (рисунок 1, б–г); перепад высоты снижается от 61 нм (для исход-

ного металлического покрытия) до 11, 22 и 29 нм для ЛБ-покрытий составов ПВК, ПВК– SiO_2 ($6,11 \cdot 10^3$ моль) и ПВК– SiO_2 ($12,22 \cdot 10^3$ моль) соответственно (область сканирования 5×5 мкм).

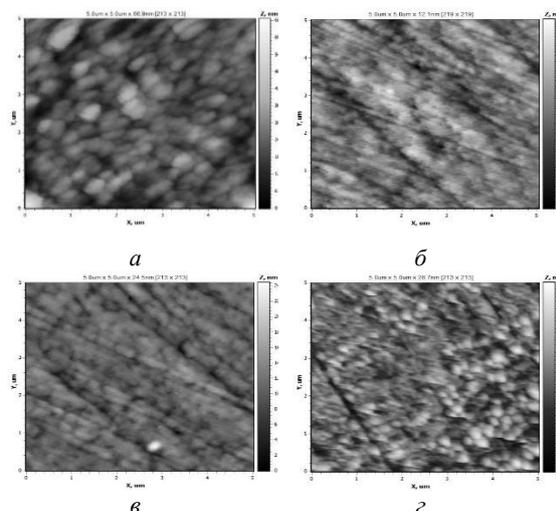


Рисунок 1 – Структура никелевого слоя (а) и покрытий ЛБ состава ПВК – (б), ПВК– SiO_2 ($6,11 \cdot 10^3$ моль – в; $12,22 \cdot 10^3$ моль – г), сформированных на поверхности никелевых электродов при $\pi = 15$ мН/м

Изолированность проводящего никелевого слоя влияет на емкостные характеристики датчиков, модифицированных композиционными ЛБ-покрытиями ПВК, и приводит к снижению предела обнаружения до 10^{-1} мМ. В случае датчиков, модифицированных композиционными покрытиями ПВК– SiO_2 , предел обнаружения катионов никеля не изменяется и составляет 10^{-3} мМ, что обусловлено развитой структурой поверхности, обеспечивающей хорошую сорбционную активность.

Формирование наноструктурированных покрытий ЛБ на поверхности никелевых электродов позволяет повысить стабильность работы емкостного датчика до 2 и 3 циклов измерений для чувствительных слоев ПВК и ПВК– SiO_2 соответственно.

Таким образом, покрытия Ленгмюра–Блоджетт на основе поливинилкарбазола с наночастицами диоксида кремния имеют перспективы применения в качестве чувствительных слоев при разработке емкостных датчиков анализа содержания тяжелых металлов в воде.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственной программы научных исследований на 2021–2025 гг. «Энергетические и ядерные процессы и технологии», подпрограммы «Энергетические процессы и технологии» (задание 2.25).

Литература

1. Conducting polymer and reduced graphene oxide Langmuir–Blodgett films: a hybrid nanostructure for high performance electrode applications / J. Wen [et al.] // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2013. – V. 25. – P. 1063–1071.

2. Room temperature operated ammonia gas sensor using polycarbazole Langmuir–Blodgett film / Vibha Saxena [et al.] // *Sensors and Actuators B Chemical*. – 2005. – V. 107. – P. 277–282.

3. Electrical transport properties characterization of PVK (poly N-vinylcarbazole) for electroluminescent devices applications / P. D'Angelo [et al.] // *Solid-State Electronics*. – 2007. – V. 51. – P. 123–129.

4. Tanami G. / Thin Nanocomposite Films of Polyaniline/Au Nanoparticles by the Langmuir–Blodgett Technique / G. Tanami, V. Gutkin, D. Mandler // *Langmuir*. – 2010. – V. 26, № 6. – P. 4239–4245.

5. Сенсорные слои полиметилметакрилата для емкостных датчиков анализа содержания катионов тяжелых металлов в воде / Д. В. Сапсалёв [и др.] // *Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук*. – 2024. – Т. 60, № 1. – С. 81–88.

УДК 004.942, 532.64

МОДЕЛИРОВАНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРОВ ВОДОЙ

Трухан Р. Э.¹, Маханёк А. А.¹, Лапицкая В. А.^{1,2}, Чижик С. А.^{1,2}, Кузнецова Д. И.²

¹Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлен обзор, посвященный молекулярно-динамическому моделированию смачиваемости полимерных материалов водой и исследованию механических свойств полимеров с применением пакета GROMACS и использованных при этом силовых полей и инструментов формирования топологических данных.

Ключевые слова: полимеры, смачиваемость, молекулярная динамика.

MODELING OF POLYMER SURFACE WETTABILITY WITH WATER

Trukhan R.¹, Makhaniok A.¹, Lapitskaya V.^{1,2}, Chizhik S.^{1,2}, Kuzniatsova D.²

¹A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. This review is devoted to molecular dynamics modeling of wettability of polymeric materials by water and the study of mechanical properties of polymers using the GROMACS package, with the force fields and topological data generation tools used in this case.

Key words: polymers, wetting, molecular dynamics.

Адрес для переписки: Трухан Р. Э., ул. П. Бровки, 15, г. Минск 220072, Республика Беларусь

e-mail: ruslan.trukhan@mail.ru

Формирование нанопленок на структурированных твердых поверхностях предполагает измерение краевого угла смачиваемости (КУС) поверхности пленки водой для контроля эффекта от модификации гидрофильно/гидрофобных свойств подложки. Кроме того, методом атомно-силовой спектроскопии измеряются также упругие и адгезионные свойства сформированных пленок. Трудоемкость и продолжительность таких экспериментов побуждает привлечение метода молекулярной динамики для количественной оценки интересующих параметров и выбора оптимальных условий модификации физико-химических свойств поверхности подложки.

Одним из распространенных пакетов молекулярно-динамического (МД) моделирования является GROMACS [1]. Хотя данный пакет ориентирован на исследование органических молекул, множество работ демонстрируют возможность успешного моделирования в нем процессов в искусственных полимерных системах. Наш выбор в пользу GROMACS обусловлен его высокой производительностью [2].

Целью данной работы является обзор публикаций, в которых данный пакет применялся для изучения различных физико-химических и механических свойств искусственных полимеров.

Публикаций, посвященных исследованию смачиваемости и механических свойств полимеров методом МД-моделирования с применением пакета GROMACS немного и, зачастую, они не содержат информацию о программных инструментах, при помощи которых авторы таких публикаций формировали файл топологии. В случае искусственных полимеров создать такой файл средствами GROMACS весьма затруднительно. Поэтому мы акцентируем внимание на работах, в которых имеется информация о полезных для решения подобной задачи скриптах и WEB-ресурсах, а также применявшихся для моделирования силовых полей.

Как правило, МД-моделирование смачиваемости полимеров водой не ограничивается определением КУС, а включает также изменения условий или факторов, влияющих на величину этого угла. Так, в работе [3] изучалось влияние рифле-

ния поверхности слоев полиэтилена (ПЭ) и поливинилхлорида (ПВХ) на КУС. Сложный контакт (при котором капля лежит на вершине неровностей поверхности) легче достигается на рифленых поверхностях ПЭ, чем на соответствующих поверхностях ПВХ. В случае ПВХ вода заполняет канавки более глубоко из-за более слабой гидрофобности поверхности ПВХ. В обоих случаях контактный угол в направлении канавок был меньше, чем в перпендикулярном направлении. Разница между двумя углами уменьшалась с увеличением размера капли воды.

Динамика смачивания твердой поверхности определяется межфазными реакциями на молекулярном уровне. В работе [4] динамический угол контакта и деформация линии контакта капли воды на ограниченной поверхности аморфного политетрафторэтилена (ПТФЭ) были исследованы с помощью МД-моделирования. В результате была подтверждена экспоненциальная модель развития области контакта в процессе смачивания, определены коэффициенты вязкого и молекулярного трения, предложено безразмерное число N_l для количественной оценки относительных колебаний скорости линии контакта.

Изучению смачивания целлюлозы водой и несколькими органическими жидкостями методом МД-динамики посвящена работа [5]. Капля жидкости задавалась цилиндрической формы. Была обнаружена сильная связь между углом контакта и поверхностным натяжением смачивающей жидкости.

Влияние химического состава и топологии линейных и трехмерных поликарбонатных полиуретанов, модифицированных полиэтиленгликолем (ПЭГ) с одинаковым количеством гидрофильных групп ПЭГ на поверхности, исследовалось МД-методом в работе [6]. Было обнаружено супергидрофильное поведение линейной топологии. Моделирование подтвердило, что более высокая гибкость ПЭГ в линейной топологии приводит к большей миграции ПЭГ к границе раздела полимера и воды, а диффузия воды в эту область приводит к лучшему экранированию нижних гидрофобных (поликарбонатных) сегментов.

Краевой угол смачивания водой поверхности полимера, а также силовое поле и применявшийся в упомянутых выше работах программный инструмент для построения файла топологии представлены в таблице 1.

С применением пакета GROMACS возможно определение механических свойств полимеров. Так, в работе [7] исследованы реакции полукристаллического полимера ПЭ при наноиндентировании и были обнаружены сильные зависимости его механических свойств от кристалличности. Использовалось диссоциативное силовое поле [8].

Таблица 1 – Результаты и средства МД-моделирования смачиваемости полимеров в научных работах

Ссылка	Полимер	КУС, °	Силовое поле / инструмент для формирования файла топологии
[3]	ПЭ, ПВХ	112–135 0–96	PCFF/ Cerius2
[4]	ПТФЭ	110,6	OPLS-AA/*
[5]	Целлюлоза	11,6; 15,6**	CHARMM36/ нет информации
[6]	ПЭГ	50	Martini-3/PolySmart

*Параметры связанного и несвязанного взаимодействия представлены в [4] детально в виде таблицы.

**Модели воды SPC/E и TIP4P, соответственно

Примером применения МД-моделирования коэффициента Пуассона упругого полимерного материала (вспененный полистирол) является работа [9].

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Конвергенция – 2025» (задание № 3.03.3).

Литература

1. GROMACS: fast, flexible, and free / D. van der Spoel [et al.] // Journ. of Comput. Chem. – 2005. – V. 26, № 16. – P. 1701–1718.
2. Loeffler, H. Large biomolecular simulation on HPC platforms II. DL POLY, Gromacs, LAMMPS and NAMD [Electronic resource] / H. H. Loeffler, M. D. Winn // ResearchGate. – Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/315786259>. – Date of access: 29.09.2024.
3. Hirvi, J. Wetting of nanogrooved polymer surfaces / J. Hirvi, A. Pakkanen // Langmuir. – 2007. – V. 23. – P. 7724–7729.
4. Zhao, L. Molecular dynamics study of contact line dynamics of water droplets on PTFE surfaces / L. Zhao, J. Cheng // Proceedings of the ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition: IMECE2016-65941. Nov. 11–17, 2016, Phoenix, Arizona, USA. – 2016. – V. 50619. – P. 1–10.
5. Sridhar, A. S. Wetting of native and acetylated cellulose by water and organic liquids from atomistic simulations / A. S. Sridhar, L. A. Berglund, J. Wohler // Cellulose. – 2023. – V. 30. – P. 8089–8106.
6. Molecular insight into the effect of polymer topology on wettability of block copolymers. The case of amphiphilic polyurethanes / A. Mirzaalipour [et al.] // Langmuir. – 2024. – V. 40. – P. 62–71.
7. Fritz, S. Considering semi-crystallinity in molecular simulations of mechanical polymer properties – using nanoindentation of polyethylene as an example / S. Fritz // Computer Methods in Materials Science. – 2021. – V. 21, № 1. – P. 35–50.
8. Development of dissociative force field for all-atomistic molecular dynamics calculation of fracture of polymers / K. Fujimoto [et al.] // Journ. of Comput. Chem. – 2019. – P. 1–6.
9. Moga, S. A. Developing a novel algorithm for the computation of Poisson's ratio using molecular dynamics for polymers / S. A. Moga, N. Goga, A. Hadar // U. P. B. Sci. Bull., Series B. – 2016. – V. 78, Iss. 1. – P. 129–136.

УДК 538.911; 538.958; 548.4; 620.3

МЭМС ДАТЧИК ТЕПЛООВОГО ПОТОКА С МЕТАПОВЕРХНОСТЬЮ

**Филатов С. А.¹, Кернасковский Ю. М.², Таратын И. А.³,
Долгих М. Н.¹, Филатова О. С.¹, Батырев Е. В.¹**

¹Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси

²ОАО «Минский институт радиоматериалов»

³Белорусский национальный технический Университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе рассматриваются особенности создания датчиков теплового потока по МЭМС технологии с чувствительными термоэлектрическими элементами толщиной 20–80 нм (поликремний *n*- и *p*-типа, при этом каждая термопара состоит из контактирующих полосок поликремния *p*-типа и поликремния *n*-типа). на поверхности оптической мембраны толщиной до 200 нм, сформированной, как метаповерхность из повторяющихся проводящих структур на диэлектрической подложке, с металлизированной поверхностью. Наличие селективного поглощения ИК-излучения метаповерхностью в центральной части датчика, где расположены «горячие» пары термопар обеспечивает высокую чувствительность датчика, образованного термоэлектрической батареей с «холодными» парами контактов на периферии датчика.

Ключевые слова: МЭМС, сенсор, метаповерхность, многоэлементная термопара.

MEMS HEAT FLOW SENSOR WITH METASURFACE

Filatov S.¹, Kernasovsky Yu.², Taratyn I.³, Dolgikh M.¹, Filatova O.¹, Batyrev E.¹

¹A. V. Lykov Institute of Heat and Mass Transfer NAS of Belarus

²JSC “Minsk Institute of Radio Materials”

³Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The paper considers the features of creating heat flow sensors using MEMS technology with sensitive thermoelectric elements 20-80 nm thick (*n*- and *p*-type polysilicon, with each thermocouple consisting of contacting strips of *p*-type polysilicon and *n*-type polysilicon). on the surface of an optical membrane up to 200 nm thick, formed as a metasurface from repeating conductive structures on a dielectric substrate, with a metallized surface. The presence of selective absorption of IR radiation by the metasurface in the central part of the sensor, where the “hot” pairs of thermocouples are located, ensures high sensitivity of the sensor formed by a thermoelectric battery with “cold” pairs of contacts on the periphery of the sensor.

Key words: MEMS, sensor, metasurface, multi-element thermocouple.

Адрес для переписки: Филатов С. А., ул. Бровки, 15, г. Минск 220072, Республика Беларусь

e-mail: fil@hmti.ac.by

Оптические метаматериалы и метаповерхности, образованные массивами периодических субволновых структур, представляют собой искусственные среды и поверхности, сформированные из повторяющихся структурных элементов – метаатомов. Интерференция излучения, взаимодействующего с метаатомами позволяет управлять электромагнитными волнами, локально изменяя фазу падающего излучения в пределах 180°, хотя при некоторых условиях изменение фазы может быть более чем 180°. В зависимости от структуры метаатомов в метаматериалах и метаповерхностях наблюдаются дипольные резонансы либо, квадрупольные резонансы при взаимодействии излучения с массивом плазмонных наночастиц, как правило, размещенных на диэлектрическом слое над проводящей металлической пленкой. Характерный размер резонансных структур имеет толщину менее длины волны [1–2].

При взаимодействии излучения в субволновом объеме с метаатомами и атомами вещества, поме-

щенного на метаповерхность, можно локализовать сильное взаимодействие электромагнитное взаимодействие с формированием оптического резонанса, что позволяет создавать эффективные оптические фильтры и детекторы молекул. Кроме того, при использовании двухслойных метаповерхностей, возникновение резонансов между ними может быть использовано для селективного поглощения оптического излучения в заданном диапазоне. Использование плазмонных метаповерхностей, сформированных из диэлектрических и металлических наночастиц и решеток, позволяют достигать максимального усиления и локализации электромагнитных полей. Использование чередующихся диэлектрических слоев, например таких как оксид индия и олова (ИО), также позволяет осуществить эффективное управление селективным поглощением электромагнитного излучения.

При создании датчиков теплового потока по МЭМС технологии чувствительные термоэлек-

трические элементы толщиной 20–80 нм формируют на поверхности оптической мембраны толщиной до 200 нм, рисунок 1. Это обеспечивает высокую чувствительность датчика, образованного термоэлектрической батареей с «холодными» парами контактов на периферии датчика, но требует формирования дополнительного поглощающего слоя в центральной части датчика, где расположены «горячие» пары термопар (полукремний *n*- и *p*-типа, при этом каждая термопара состоит из контактирующих полосок поликремния *p*-типа и поликремния *n*-типа).

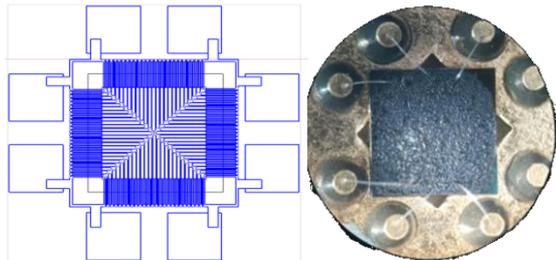


Рисунок 1 – Топология термоэлектрического датчика теплового потока и вид чувствительного элемента с поглощающим слоем

Механизм поглощения в этом случае, в основном, определяется возбуждением локализованных электромагнитных резонансов и сильно зависит от геометрии метатомов (структур образующих верхний металлический слой) и толщины диэлектрического слоя.

В качестве эффективного селективного поглотителя оптического излучения можно использовать метаповерхность сформированную из повторяющихся проводящих структур на диэлектрической подложке, с металлизированной поверхностью, рисунок 2. В случае поверхностной структуры образованной равноплечными проводящими крестами обеспечивается поляризационно-нечувствительное поглощение оптического излучения с порогом, определяемым размерами и периодом повторения металлических элементов структуры, рисунок 3.

Элементарная ячейка такого широкополосного абсорбера в форме металлического креста толщиной 50 нм на поверхности слоя диэлектрика 200 нм, лежащего на проводящем (Au) основании толщиной 50 нм повторяется с периодом 300 нм в квадратной решетке.

Для моделирования спектральных характеристик метаповерхностей в гигагерцовом диапазоне может быть использовано специализированное программное обеспечение Ansys HFSS (High Frequency Structure Simulator).

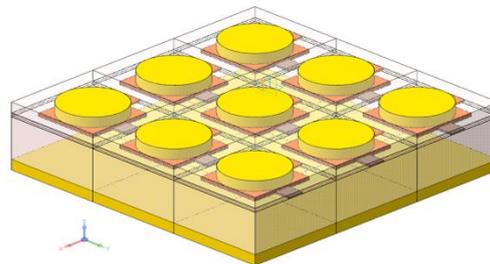


Рисунок 2 – Метаповерхность из повторяющихся металлических структур на слое диэлектрика на металле

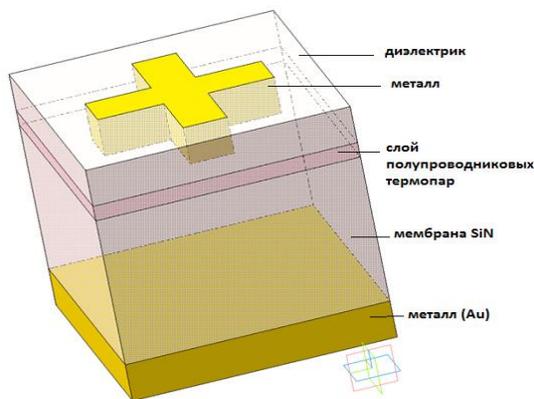


Рисунок 3 – Структура элементарной ячейки (метаатома) метаповерхности

Предложенные решения позволяют селективно оптимизировать спектральный диапазон чувствительности термоэлектрических многоэлементных МЭМС датчиков оптического излучения.

Литература

1. Высокоэффективный оптический поглотитель на основе плазмонного метаматериала / J. Hao [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2010. – V. 96. – P. 251104.
2. Wu, С. Проектирование поверхностей метаматериалов с широкополосным поглощением / С. Wu, G. Shvets // *Opt.Lett.* – 2012. – V. 37. – P. 308–310.

УДК 620.186.82; 620.178.154.9

**ИЗМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОСАЖДЕНИЯ КАК СПОСОБ
УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ ПОВЕРХНОСТИ ДВУХСЛОЙНЫХ
ПОКРЫТИЙ AlN**

**Хабарова А. В.¹, Лапицкая В. А.^{1,2}, Чижик С. А.^{1,2}, Трухан Р. Э.¹, Николаев А. Л.³,
Садырин Е. В.³, Айзикович С. М.³**

¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

³Донской государственной технической университет
Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация. Методом наноиндентирования определены физико-механические свойства – модуль упругости E (ГПа) и микротвердость H (ГПа) – двухслойных покрытий AlN. Покрытия толщиной 400 и 800 нм осаждены на кремниевые подложки магнетронным методом $Al_{82,8}N_{17,2}/Al_{70,3}N_{29,7}$ и $Al_{70,3}N_{29,7}/Al_{82,8}N_{17,2}$. Уменьшение толщины каждого из слоев двухслойных покрытий от 400 до 200 нм приводит к снижению значений шероховатости и повышению физико-механических свойств в 2,3–2,8 раз.

Ключевые слова: двухслойное покрытие AlN, магнетронное распыление, шероховатость, модуль упругости, микротвердость.

**CHANGING THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF DEPOSITION AS A WAY TO CONTROL
THE STRUCTURE AND SURFACE PROPERTIES OF TWO-LAYER AlN COATINGS**

Khabarava A.¹, Lapitskaya V.^{1,2}, Chizhik S.^{1,2}, Trukhan R.¹, Nikolaev A.³, Sadyrin E.³, Aizikovich S.³

¹A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

³Don State Technical University
Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract. The nanoindentation method was used to determine the physical and mechanical properties – elastic modulus E (GPa) and microhardness H (GPa) – of two-layer AlN coatings. Coatings with a thickness of 400 and 800 nm were deposited on silicon substrates using the magnetron method $Al_{82,8}N_{17,2}/Al_{70,3}N_{29,7}$ and $Al_{70,3}N_{29,7}/Al_{82,8}N_{17,2}$. Reducing the thickness of each layer of the two-layer coatings from 400 to 200 nm leads to a decrease in roughness values and an increase in the physical and mechanical properties by 2.3–2.8 times.

Key words: two-layer AlN coating, magnetron sputtering, roughness, elastic modulus, microhardness.

Адрес для переписки: Хабарова А. В., ул. П. Бровки, 15, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: AV.Khabarova@mail.ru

Введение. Создание многослойных покрытий позволяет изменить характеристики покрытий и расширить их область применения. Варьирование параметрами осаждения в процессе нанесения покрытий, позволяет влиять на структуру и напряжения внутри покрытия, что в дальнейшем изменяет как микроструктуру поверхности, так и физико-механические и трибологические свойства. Так, создание градиентных покрытий на основе AlN позволяет повлиять на внутренние напряжения в покрытии, и, в результате, на функциональные свойства устройств [1].

Покрытия на основе AlN обладают комплексом электрических свойств, позволяющим эффективно применять их в различных электронных устройствах и микроэлектронике. В этом случае важную роль играют не только электрические свойства и структура, но и свойства поверхности: шероховатость, физико-механические и трибологические свойства [2].

Формирование таких покрытий можно проводить путем изменения технологических параметров осаждения покрытий (мощность смещения на подложке [3], температура [4]).

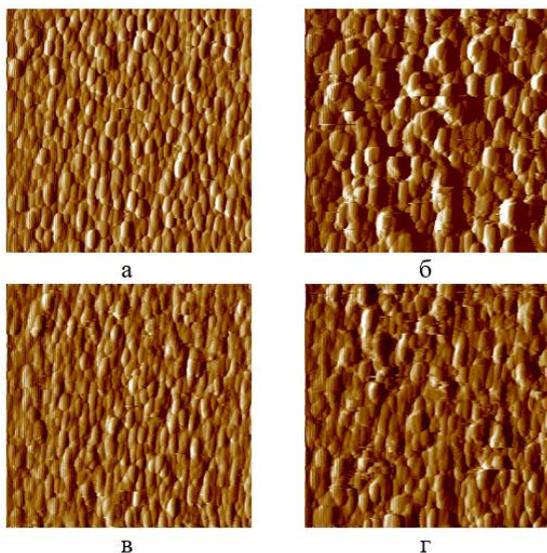
Целью работы является исследование особенностей морфологии и физико-механических свойств методом наноиндентирования двухслойных покрытий AlN, нанесенных магнетронным методом.

Материалы и методы исследований. Покрытия наносили на кремниевые подложки ориентации (100) вакуумно-магнетронным методом с помощью системы VSM 100 (ROBvac, Российская Федерация) при постоянном давлении в камере 0,78 Па. Подбор состава каждого из слоев выполнялся по результатам определения физико-механических и трибологических свойств на каждом отдельном из слоев – выбраны с наилучшими свойствами [5]. Получены две группы образцов – $Al_{82,8}N_{17,2}/Al_{70,3}N_{29,7}$ и $Al_{70,3}N_{29,7}/Al_{82,8}N_{17,2}$. Толщина каждого слоя 200 и 400 нм.

Исследование микроструктуры, определение шероховатости и физико-механических свойств двухслойных покрытий AlN проведено на наноинденторе модели 750 Ubi (Hysitron, США). Использовали алмазный индентор конической формы с радиусом закругления острия 226 нм. Для определения физико-механических свойств (модуль упругости E и микротвердость H) покрытий проводили индентирование в 9 точках с фиксированной глубиной внедрения, которая не превышает 10 % от общей толщины покрытия.

Результаты исследований и обсуждения.

На рисунке 1 приведена морфология поверхности двухслойных покрытий AlN (размер поля 10×10 мкм). Определена шероховатость покрытий – у покрытия с верхним слоем $Al_{82,8}N_{17,2}$ (рисунок 1 а, б) значения возрастают при увеличении толщины слоев от 200 до 400 нм – R_a от 12,2 до 50,5 нм, а R_q от 15,3 до 64,0 нм соответственно. При верхнем слое $Al_{70,3}N_{29,7}$ (рисунок 1 в, г) шероховатость ниже, чем у покрытия с верхним слоем $Al_{82,8}N_{17,2}$. При толщине 200 нм шероховатость R_a и R_q составляет 11,1 и 13,9 нм, тогда как при толщине 400 нм – 25,49 и 32,84 нм, соответственно.



а, б – с верхним слоем $Al_{82,8}N_{17,2}$;
в, г – с верхним слоем $Al_{70,3}N_{29,7}$

Рисунок 1 – Морфология поверхности (10×10 мкм) двухслойных покрытий AlN

Физико-механические свойства двухслойных покрытий AlN приведены в таблице 1. При увеличении толщины слоев от 200 до 400 нм модуль

упругости и микротвердость снижаются вне зависимости от типа верхнего слоя. При этом у покрытия с верхним слоем $Al_{82,8}N_{17,2}$ H и E выше, чем у покрытия с верхним слоем $Al_{70,3}N_{29,7}$. Самые высокие значения физико-механических свойств определены у покрытий, имеющих толщину каждого слоя 200 нм – $E = 45,18 \pm 19,83$ ГПа при $H = 0,73 \pm 0,37$ ГПа для покрытия с верхним слоем $Al_{82,8}N_{17,2}$ и $E = 33,04 \pm 8,58$ ГПа при $H = 0,44 \pm 0,13$ ГПа для покрытия с верхним слоем $Al_{70,3}N_{29,7}$.

Таблица 1 – Физико-механические свойства двухслойных покрытий AlN

Верхний слой покрытия	Толщина каждого слоя, нм	Модуль упругости E , ГПа	Микротвердость H , ГПа
$Al_{82,8}N_{17,2}$ 2	200	$45,18 \pm 19,83$	$0,73 \pm 0,37$
	400	$15,81 \pm 7,67$	$0,37 \pm 0,15$
$Al_{70,3}N_{29,7}$ 7	200	$33,04 \pm 8,58$	$0,44 \pm 0,13$
	400	$14,07 \pm 2,99$	$0,24 \pm 0,05$

Установлено, что лучшими физико-механическими свойствами и низкой шероховатостью обладает двухслойное покрытие AlN, нанесенное магнетронным методом, имеющее толщину каждого слоя 200 нм с верхним составом $Al_{82,8}N_{17,2}$ – $E = 45,18 \pm 19,83$ ГПа при $H = 0,73 \pm 0,37$ ГПа.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № T23РНФ-132).

Литература

1. Structure and morphology evolution of ALN films grown by DC sputtering / M. A. Auger [et al.] // Surf. Coatings Technol. – 2004. – V. 180. – P. 140–144.
2. Electrical characterization and morphological properties of AlN films prepared by dc reactive magnetron sputtering / M. A. Moreira [et al.] // Microelectron. Eng. – 2011. – V. 88, № 5. – P. 802–806.
3. Method for controlling stress gradients in PVD aluminum nitride / K. E. Knisely [et al.] // Journal of Micro-mechanics and Microengineering. – 2018. – V. 28, iss. 11. – P. 115009.
4. Epitaxial growth of AlN films on sapphire via a multilayer structure adopting a low-and high-temperature alternation technique / X. Zhang [et al.] // CrystEngComm. – 2015. – V. 17, iss. 39. – P. 7496–7499.
5. Deposition and Characterization of Magnetron Sputtered AlN Coatings with Variable Stoichiometry / A. L. Nikolaev [et al.] // Advances in Linear and Nonlinear Continuum and Structural Mechanics. Advanced Structured Materials. Springer, Cham. – 2023. – V. 198. – P. 357–367.

УДК 519.688:681.586.2

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ КОМПАКТНОГО ВЫСОКОТОЧНОГО ИНЕРЦИАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ НА БАЗЕ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Хмарский П. А., Наумов А. О.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Представлены особенности разработки компактного высокоточного инерциального измерительного модуля на базе микроэлектромеханических систем. Показано, что МЭМС-технологии позволяют создавать миниатюрные, энергоэффективные и надежные навигационные модули, но с ограничениями по точности. Рассмотрены этапы проектирования: постановка требований, математическое моделирование, анализ параметров датчиков, выбор элементной базы.

Ключевые слова: инерциальный измерительный модуль, микроэлектромеханические системы, проектирование, точность измерений.

DESIGN OF A COMPACT HIGH-PRECISION MEMS-BASED INERTIAL MEASUREMENT UNIT

Khmarski P., Naumov A.

*Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The features of development of a compact high-precision inertial measurement unit based on microelectromechanical systems (MEMS) are presented. It is shown that MEMS-technologies allow to create miniaturised, energy-efficient and reliable navigation modules, but with accuracy limitations. The stages of design are considered: setting requirements, mathematical modelling, analysis of sensor parameters, element base.

Key words: inertial measurement unit; microelectromechanical systems; design; measurement accuracy.

*Адрес для переписки: Хмарский П.А., 16, ул. Академическая, 220072, Минск, Республика Беларусь
e-mail: pierre2009@mail.ru*

Введение. Инерциальные измерительные модули (Inertial measurement unit – IMU) являются ключевым компонентом современных навигационных систем, играя важную роль в робототехнике, беспилотных транспортных средствах, системах виртуальной и дополненной реальности, а также в медицине. В последние годы наблюдается значительный прогресс в области микроэлектромеханических систем (МЭМС), что открыло новые возможности для создания малогабаритных и высокоточных IMU-сенсоров [1, 2].

МЭМС-технологии позволяют интегрировать механические элементы, датчики, актуаторы и электронику на одном кремниевом чипе, используя микропроизводственные процессы. Это обеспечивает ряд преимуществ: миниатюризация (МЭМС-датчики могут быть значительно меньше традиционных механических аналогов); низкое энергопотребление (критично для портативных и автономных устройств); высокая надежность (отсутствие движущихся макрочастей); массовое производство (снижает стоимость).

Однако МЭМС-датчики также имеют свои ограничения, в частности, связанные с точностью и стабильностью измерений. Основные проблемы включают: дрейф нуля (bias instability); случайное блуждание (random walk); чувствительность датчиков к температуре и механическим воздействиям.

В данном докладе рассмотрены особенности разработки компактного высокоточного IMU на базе МЭМС-технологий, способного преодолеть эти ограничения и конкурировать с лучшими мировыми образцами по точности и надежности измерений.

Методология. Ключевым фактором при проектировании IMU-сенсора является постановка задачи, в которой должно быть указано:

1. Целевые характеристики: требуемый диапазон и точность измерения ускорений, угловых скоростей и ориентации; допустимые габариты и массу датчика; требования к энергопотреблению;
2. Условия эксплуатации: диапазон рабочих температур и влажности; воздействие вибраций, ударов и других механических нагрузок;
3. Технологические требования: использование МЭМС-технологий для обеспечения миниатюризации и серийности; применение современной элементной базы и конструктивных решений;
4. Требования к интерфейсам: тип и параметры цифрового/аналогового интерфейса для подключения к системам-потребителям; возможность интеграции в различные приложения;
5. Временные и стоимостные ограничения: сроки разработки и изготовления опытных образцов; целевая себестоимость производства датчика.

После постановки задачи в проектирование IMU-сенсора на основе МЭМС-технологий рекомендуется включать следующие этапы:

1. Разработку математической модели инерциальной системы на основе МЭМС-датчиков;
2. Исследование и оптимизацию алгоритмов калибровки датчиков, обработки и объединения данных для определения угловой ориентации (sensor fusion);
3. Анализ влияния различных параметров МЭМС-датчиков на точность измерений;

4. Обоснование выбора элементной базы;

5. Формирование общих требований к испытаниям МЭМС IMU-сенсоров.

Математическое моделирование. должно обеспечивать:

возможность имитации произвольного вращения IMU с возможностью настройки частоты дискретизации;

имитацию работы физических датчиков (акселерометр, гироскоп, магнитометр), входящих в состав IMU, на основе реальных характеристик из созданной базы данных.

После реализации математических моделей целесообразно разработать и провести исследование алгоритмов **sensor fusion**. Задача **sensor fusion** заключается в интегрировании и объединении данных от различных датчиков IMU-сенсора с целью получения более точной, достоверной и комплексной информации об измеряемых параметрах (в первую очередь углов ориентации). Рекомендуется рассматривать следующие широко используемые алгоритмы **sensor fusion** [2]: комплиментарный фильтр; AHRS-фильтр Калмана; AHRS-фильтр Мэдджвика; AHRS-фильтр Махони. Выбор конкретного алгоритма **sensor fusion** для интеграции данных от различных датчиков в составе IMU-сенсора зависит от следующих ключевых факторов:

1. Количество и типы датчиков: число и характеристики акселерометров, гироскопов, магнитометров и др.; различная точность, частота обновления, шумовые свойства датчиков;

2. Требования к точности и динамике: необходимая точность определения ориентации, линейных/угловых скоростей; требования к быстродействию и реакции на динамические изменения;

3. Условия эксплуатации: наличие возмущающих факторов (магнитные поля, вибрации и т.п.); особенности среды применения (наземные, воздушные, подводные системы);

4. Вычислительные ограничения: доступная вычислительная мощность бортовых процессоров; требования к энергопотреблению и занимаемым ресурсам;

5. Требования к ошибкам и устойчивости: допустимые уровни ошибок оценки ориентации, положения, скоростей; устойчивость к сбоям отдельных датчиков.

Для каждого алгоритма **sensor fusion** целесообразно выполнить: анализ работы с параметрами по умолчанию; оптимизация параметров с использо-

ванием различных оптимизаторов; исследование эффективности при различных входных данных.

Исследование алгоритмов калибровки. При разработке алгоритмов калибровки датчиков, входящих в состав компактного высокоточного IMU-сенсора, следует обратить внимание на следующие ключевые аспекты: компенсация смещений и нелинейностей; температурная компенсация; устранение взаимных влияний; учет погрешностей ориентации; адаптивность и обучаемость; вычислительная эффективность.

Комплексный учет данных аспектов при разработке алгоритмов калибровки позволит обеспечить высокую точность и стабильность показаний компактного IMU-сенсора.

Анализ влияния параметров датчиков. Целесообразно детально исследовать влияние различных параметров датчиков на точность определения ориентации. Проводимый анализ должен включать: оценку влияния спектральной плотности шума; исследование влияния различных составляющих смещения (bias); анализ влияния перекоса осей и нестабильности смещения; оценку влияния разрешения и диапазона измерений

При выборе элементной базы особое внимание уделялось МЭМС-компонентам, обеспечивающим оптимальное сочетание точности, стабильности и энергоэффективности.

Заключение. Инерциальные измерительные модули на базе МЭМС-технологий являются важным компонентом современных навигационных систем в широком спектре применений. МЭМС-технологии обеспечивают преимущества по миниатюризации, энергоэффективности и надежности, но имеют ограничения по точности и стабильности МЭМС-датчиков. Проектирование высокоточного компактного IMU требует четкой постановки технических требований и комплексного подхода, включающего математическое моделирование, калибровку и анализ влияния параметров датчиков. Особое внимание должно быть уделено выбору оптимальных МЭМС-компонентов по точности, стабильности и энергоэффективности.

Литература

1. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В. В. Матвеев, В. Я. Распопов. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2009. – 280 с.

2. Grewal, M. S. Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration / M. S. Grewal, A. P. Anrews, C. G. Bartone. – Wiley, 2020. – 568 p.

УДК 538.915

ХАОТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ НА ПОВЕРХНОСТИ ВЫРОЖДЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И В КОНТАКТАХ**Филимонов А. В., Бондаренко В. Б., Кораблев В. В.***Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого
Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. В работе обсуждаются естественные неоднородности потенциала на поверхности вырожденного полупроводника и флуктуации высоты барьера в контактах металл-полупроводник. Определены характерные значения амплитуды хаотического потенциала в случае линейного экранирования электроактивной примеси. Показана зависимость данных неоднородностей от электрофизических параметров полупроводника.

Ключевые слова: хаотический потенциал, естественный размерный эффект, вырожденный полупроводник.

CHAOTIC POTENTIAL ON THE DEGENERATED SEMICONDUCTOR SURFACE AND IN CONTACTS**Alexey V. Filimonov, Vyacheslav B. Bondarenko, Vadim V. Korablev***Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
St. Petersburg, Russia*

Abstract. In this paper, natural heterogeneities of the potential on the degenerated semiconductor surface are discussed as well as the barrier height fluctuations in metal-semiconductor contacts. In the case of electroactive dopant linear screening, characteristic values of chaotic potential amplitudes have been defined. The dependence is shown of these heterogeneities on semiconductor electrophysical parameters.

Key words: chaotic potential, natural dimensional effect, degenerated semiconductor.

Адрес для переписки: Филимонов А.В., ул. Политехническая, 29, г. Санкт-Петербург 195251, Россия
e-mail: filimonov@rphf.spbstu.ru

Известно, что случайно распределённая примесь в легированных полупроводниках создает хаотический потенциал в объёме указанных систем [1]. Получить конкретные параметры этого потенциала возможно, например, в случае линейного экранирования [2], когда потенциальная энергия электрона в поле i -го заряженного центра, например, однозарядного донора на расстоянии r от него представляется в виде

$$U_i(r) = -\frac{e^2}{\epsilon r} \cdot \exp(-\lambda r). \quad (1)$$

В данном выражении ϵ - диэлектрическая проницаемость полупроводника, λ - параметр экранирования (величина обратная длине экранирования). Выявленные неоднородности сохраняют свой характер у диэлектрической поверхности полупроводника, где при высоких степенях легирования обостряется естественный размерный эффект [3, 4] – сравнимость масштабов областей пространственного заряда со средним расстоянием между примесными атомами. Однако, в условиях вырождения необходимо учитывать экранирование приповерхностного объёмного заряда примеси трёхмерным электронным (или дырочным) газом. При наличии же делокализованных двумерных носителей на поверхности полупроводниковых структур дополнительно возникает соответствующий диэлектрический отклик поверхностной подсистемы. Целью настоящего сообщения является анализ хаотического

потенциала на поверхности вырожденного полупроводника и полупроводниковых структур.

Будем рассматривать однородно легированный и вырожденный полупроводник донорного типа. В пределе низких температур свободный электронный газ в зоне проводимости такой системы при параболическом законе дисперсии характеризуется энергией Ферми E_F :

$$E_F = \frac{\hbar^2}{m^*} (3\pi^2 n)^{2/3}. \quad (2)$$

Здесь n – концентрация свободных электронов в зоне проводимости, m^* – их эффективная масса. При сильном вырождении как правило $E_F \gg \delta U$ и можно пренебречь изменением плотности состояний на уровне Ферми. В рамках квазиклассического приближения параметр экранирования в этом случае определена как величина, обратная радиусу экранирования Томаса-Ферми:

$$\lambda = \sqrt{\frac{4\pi e^2 D(E_F)}{\epsilon}}. \quad (3)$$

В выражении (3) $D(E_F)$ – величина плотности электронных состояний в зоне проводимости полупроводника на уровне Ферми. Теперь возможно проведения статистического анализа хаотического потенциала на свободной поверхности полупроводника [3]. Разумеется, конечный результат зависит от характера поверхностных

состояний. Если поверхность диэлектрическая, то в рамках статистического анализа амплитуда хаотического потенциала на поверхности полупроводника с уровнем легирования N_0 имеет вид

$$\delta U = \frac{2e^2}{\varepsilon + 1} \sqrt{\frac{N_0}{\lambda}}. \quad (4)$$

Если же на поверхности вырожденного полупроводника имеется делокализованный поверхностный заряд, то при высокой плотности поверхностных состояний D_s (порядка $10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ и более) для определения параметров хаотического потенциала имеется возможность воспользоваться методом электростатических изображений. В этом случае флуктуациям поверхностного потенциала соответствуют флуктуации плотности поверхностного заряда $\delta\sigma \approx eD_s\delta U$ и, следовательно,

$$\delta U = \frac{1}{D_s} \sqrt{\frac{\lambda N_0}{\pi}}. \quad (5)$$

Аналогичным образом можно оценить величину неоднородности потенциала в контакте металл-полупроводник. Известно, что изменение эффективной высоты барьера в контакте связана с величиной напряженности электрического поля у границы раздела. Произведя необходимые вычисления с использованием ранее разработанного алгоритма [3], получаем

$$\delta U_{\text{eff}} = \frac{e^2 \lambda}{\varepsilon}. \quad (6)$$

Таким образом, величина δU_{eff} примерно равна кулоновской энергии в диэлектрической среде с проницаемостью ε однозарядного центра на расстоянии длины экранирования от него.

Подведём некоторые итоги приведенного исследования. Прежде всего следует отметить растущие степенные зависимости рассчитанных величин δU и δU_{eff} от уровня легирования. При практически полной ионизации доноров выполняется условие $n \approx N_0$. Соответственно, при отсутствии на свободной поверхности полупроводника делокализованного заряда $\delta U(N_0) \propto N_0^{5/12}$ (соотношение (4)). На проводящей же поверхности согласно (5) зависимость оказывается несколько более сильной: $\delta U(N_0) \propto N_0^{7/12}$. Но наиболее слабой функцией от N_0 является величина характерных неоднородностей эффективного барьера в контактах металл-полупроводник. Проведённый анализ показал, что δU_{eff}

(выражение (6)) пропорционально корню шестой степени из N_0 . Другими словами, в широком диапазоне вырождения полупроводника величины флуктуаций эффективного барьера остаются практически на одном и том же уровне. При типичных значениях электрофизических параметров полупроводниковых соединений $\text{Al}^{\text{III}}\text{V}^{\text{V}}$ ($\varepsilon \sim 10$, $m^* \sim 0.1 \cdot m$ [5], m – масса покоя электрона) и уровня легирования порядка 10^{20} см^{-3} указанные естественные неоднородности барьера характеризуются величиной около 50 мэВ. Имеются также различия в зависимости величин δU и δU_{eff} от диэлектрического отклика полупроводника. С учётом условия $\varepsilon \gg 1$ очевидно, что при локализованном поверхностном заряде $\delta U(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-3/4}$. На проводящей поверхности соответствующая зависимость существенно слабее ($\propto \varepsilon^{-1/4}$). В контакте же металл-полупроводник зависимость δU_{eff} от диэлектрической проницаемости полупроводника оказалась наиболее сильно убывающей: $\delta U_{\text{eff}}(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-3/2}$. Последний факт позволяет значительно нивелировать рассматриваемые неоднородности барьера в контакте при использовании полупроводниковых материалов с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon \gg 10$.

Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2023-0016).

Литература

1. Шкловский, Б. И. Электронные свойства легированных полупроводников. / Б. И. Шкловский, А. Л. Эфрос. – М.: Наука, 1979. – 416 с.
2. Бонч-Бруевич, В. Л. Электронная теория неупорядоченных полупроводников. / В. Л. Бонч-Бруевич, И. П. Звягин, Р. Кайпер, А. Г. Миронов, Р. Эндерлайн, Б. Эссер. – М.: Наука, 1981. – 384 с.
3. Бондаренко, В. Б. Анализ естественных неоднородностей потенциала у поверхности примесного полупроводника. / В. Б. Бондаренко, М. В. Кузьмин, В. В. Кораблев // Физика и техника полупроводников. – 2001. – Т 35, вып. 8. – С. 964–968.
4. Бондаренко, В. Б. Естественные неоднородности потенциала на поверхности полупроводника при равновесном распределении примеси. / В. Б. Бондаренко, С. Н. Давыдов, А. В. Филимонов // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т 44, вып. 1. – С. 44–47.
5. Sze, S. M. Physics of Semiconductor Devices. / S. M. Sze. – Bell Laboratories, Incorporated Murray Hill, New Jersey A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1981.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

<i>Dipak Patil, Suyog Pande, Akhilesh Kuma</i> EXPLORING THE PROPERTIES AND APPLICATIONS OF METAMATERIAL STRUCTURES	5
<i>Musiiwa P., Tyavlovsky A., Zizhou C.</i> RESEARCH AND EDUCATION OPPORTUNITIES IN PARTNERSHIP BETWEEN HARARE INSTITUTE OF TECHNOLOGY AND BNTU	7
<i>Zhou Xuefeng</i> SCALABLE 3D PERCEPTION: FROM ENVIRONMENTAL RECONSTRUCTION TO WORKPIECE MEASUREMENT	9
<i>Рачицкий А. М., Таболич Т. Г.</i> ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШКОЛЫ РАЗРАБОТЧИКОВ ЭЛЕКТРО-И РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ В УСЛОВИЯХ САНКЦИОННОЙ ПОЛИТИКИ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ ОТРАСЛИ	10

Секция 1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ, ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА БЕЗОПАСНОСТИ

<i>Suhas Raosaheb Kale, Dipak Pandurang Patil, Akhilesh Kumar</i> A FOAM-BASED PARTIAL GROUND WEARABLE MICROSTRIP PATCH ANTENNA FOR 5G WIRELESS APPLICATIONS.....	13
<i>Chen Shilang, Romashko E., Pantsialeyeu K.</i> DIGITAL TECHNOLOGIES FOR SUPPORTING THE TRAINING PROCESS IN TENNIS	15
<i>Zhang Yun</i> EXPERIMENTAL STUDY ON THE POSSIBLE EFFECTS OF MOBILE PHONE BACKGROUND LIGHT ON HUMAN BODY	17
<i>He Kanghui, Borbat M., Samaryna A., Pantsialeyeu K.</i> APPLICATION OF ELECTRONIC MEANS IN COACHING CONTROL OF VOLLEYBALL	18
<i>Антошин А. А., Галузо В. Е., Пинаев А. И.</i> ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПЫТАНИЯМ СИСТЕМ ПРОТИВОДЫМНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ	20
<i>Антошин А. А., Третьяк И. Б.</i> ТРЕБОВАНИЯ К ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ КАМЕРЫ ТОЧЕЧНОГО ДЫМОВОГО ПОЖАРНОГО ИЗВЕЩАТЕЛЯ	21
<i>Антошин А. А., Никитин В. И.</i> ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ФАКТОРОВ ПОЖАРА ЗА ПРЕДЕЛАМИ ОБЛАСТИ ГОРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ ОТ БЕСПЛАМЕННОГО К ПЛАМЕННОМУ	23
<i>Воробей Р. И., Гусев О. К., Свистун А. И., Тявловский А. К., Тявловский К. Л., Шадурская Л. И.</i> ПОЛЕВОЙ ФОТОТРАНЗИСТОР	25
<i>Балухо И. Н., Дудчик Ю. И., Кухарчик Н. В., Кольчевский Н. Н.</i> ПОЛУЧЕНИЕ ЦИФРОВЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ СНИМКОВ СЕМЯН ПЛОДОВО-ЯГОДНЫХ КУЛЬТУР	27
<i>Булатов О. В.</i> РАЗМЕРЫ ИНФОРМАТИВНОЙ ЗОНЫ ОПТИМИЗИРОВАННЫХ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	29
<i>Габец В. Л., Бондаренко В. А.</i> ИНТЕРАКТИВНЫЙ КОРРЕКТОР ОСАНКИ	31
<i>Горанов И. В., Назарчук К. А., Грабчиков С. С., Драпезо А. П., Лосев А. В.</i> КОНСТРУКЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДАТЧИКА АБС	33
<i>Гриц М. А., Савёлов И. Н.</i> КОМБИНИРОВАННЫЙ ПРИБОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСВЕЩЕНИЯ	35
<i>Громыко И. Л., Монархович И. Е.</i> РАЗРАБОТКА НЕЙРОННОЙ СЕТИ RESNET-18 ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ МЕЖВИТКОВЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ОДНОФАЗНОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ	37
<i>Губайдуллина А. В., Смирнова С. В., Благовещенский А. Н.</i> РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ МЕДИЦИНСКОГО ОДЕЯЛА	38

<i>Гусев О. К., Воробей Р. И., Свистун А. И., Тявловский А. К., Тявловский К. Л., Шадурская Л. И.</i> ПРИБОРНЫЙ РЯД МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ	40
<i>Дедович Н. Н., Романов А. Ф.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	42
<i>Дедович Н. Н., Романов А. Ф.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	44
<i>Добрыднеев А. В., Безкоровайный В. С.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФЕРРОЗОНДОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА	46
<i>Дудчик Ю. И., Балуха И. Н., Кольчевский Н. Н.</i> ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ В РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПИНХОЛ-КАМЕРЫ И ОПТИКИ КУМАХОВА	48
<i>Жарин А. Л., Тявловский А. К., Пантелеев К. В., Свистун А. И., Микитевич В. А., Воробей Р. И., Гусев О. К., Борисенко С. В., Самарина А. В., Мухуров Н. И.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ И СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ	50
<i>Завадская Т. Е.</i> ТЕСТИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ УЯЗВИМОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ.....	52
<i>Здоровцев С. В., Кушнеров Д. П., Шевченко А. В.</i> ЦИФРОВОЙ ЛАЗЕРНЫЙ ДАЛЬНОМЕР С РАДИОИНТЕРФЕЙСОМ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ	54
<i>Зельманский О. Б., Богуш В. А.</i> АППАРАТУРА КОНТРОЛЯ И ВЫВЕДЕНИЯ АЛКОГОЛЯ ИЗ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ДЫХАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ	56
<i>Исаев А. В., Суходолов Ю. В., Купреенко К. А., Койро А. В., Лычковский В. А.</i> АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН	58
<i>Казаков В. И., Рывкина Я. А., Параскун А. С.</i> ЛАЗЕРНЫЙ СЕНСОР ДЫМА И ТЕПЛООВОГО КОНВЕКЦИОННОГО ПОТОКА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ.....	60
<i>Камышан А. С., Комаров Ф. Ф., Пилько В. В., Пилько В. В.</i> КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР.....	62
<i>Карташова Ж. К.</i> ЗАЩИТА ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОЙ ПОДМЕНЫ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЛЕКСА ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИГНАЛОВ	64
<i>Ковыньев Н. В.</i> МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ	65
<i>Ковыньев Н. В.</i> ОБРАБОТКА ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ ИСПОЛЬЗУЯ ВЕЙВЛЕТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ.....	67
<i>Конойко А. И., Кравченко В. М., Кузьмицкая А. С., Малютина-Бронская В. В., Солодуха В. А.</i> ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАТРИЧНЫХ ТЕРМООПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИНФРАКРАСНЫХ СИСТЕМ	69
<i>Крень А. П., Кутепов А. Ю., Никифоров А. В., Турсунов Н. К., Уразбаев Т. Т.</i> ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТВЕРДОСТИ ЧУГУНА	71
<i>Кудина А. В., Франко Е. П., Денскевич А. Д., Есьман Г. А.</i> КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ АКУСТИЧЕСКИХ СЕЙФОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ СМАРТФОНОВ ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОЙ АКТИВАЦИИ	73
<i>Ломако А. А., Козлова Е. И.</i> ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРИПТОМОДУЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МИНИМАЛЬНО ИЗБЫТОЧНЫХ МОДУЛЯРНЫХ СИСТЕМ СЧИСЛЕНИЯ ДЛЯ ШИФРОВАНИЯ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ	75
<i>Медведев Н. В.</i> АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ SIEM СИСТЕМОЙ	77

<i>Мисюкевич Н. С.</i> МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	79
<i>Мороз А. С., Фролов Н. Н., Тявловский А. К.</i> ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕРМО-ЭДС ТЕРМОПАР	81
<i>Рябцев В. Н., Хейфец М. Л., Савеня П. С.</i> ДИАГНОСТИКА ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОТОКОВ ДАННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА	84
<i>Ризноокая Н. Н., Парица И. А., Красневский Д. Ю., Абдулазиз Абдуллах Кауд А.</i> ДЕМПФИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ МАЯТНИКА	82
<i>Савёлов П. И., Щавлев А. А.</i> КОМПОНОВКА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ	87
<i>Савкова Е. Н.</i> НОРМИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ В КОЛОРИМЕТРИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ	89
<i>Свистун А. И., Жарин А. Л., Тявловский А. К., Пантелеев К. В., Микитевич В. А., Воробей Р. И., Гусев О. К., Тявловский К. Л., Мухуров Н. И.</i> ВЫЯВЛЕНИЕ СКРЫТЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОДЛОЖЕК МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДА КЕЛЬВИНА	91
<i>Сидлеров Д. Ю., Микитчук К. Б., Чиж А. Л.</i> ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ СВЧ-СИГНАЛА НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК С ВЫСОКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ХРОМАТИЧЕСКОЙ ДИСПЕРСИИ	92
<i>Ткаченко В. В., Филипеня О. Л., Храбров В. В.</i> О ФОРМИРОВАНИИ ЭТАЛОНОВ РАСПОЗНАВАНИЯ СИГНАЛОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ДЕФЕКТАЦИИ С ПРИБОРАМИ МНОГОКАНАЛЬНОГО ВИБРОДИАГНОСТИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ МАШИН И АГРЕГАТОВ И ИХ УЗЛОВ	94
<i>Тявловский А. К., Тявловский К. Л., Жарин А. Л., Воробей Р. И., Гусев О. К., Пантелеев К. В., Борисенок С. В., Самарниа А. В.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ТВЕРДОСТИ И РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА С ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА	96
<i>Тявловский К. Л., Воробей Р. И., Гусев О. К., Свистун А. И., Тявловский А. К., Шадурская Л. И.</i> МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ПОЛЕВОГО ФОТОТРАНЗИСТОРА	98
<i>Филатов С. А., Гайкевич Д. Н.</i> АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНЫМИ СЕНСОРНЫМИ СИСТЕМАМИ	100
<i>Шилин А. А., Журавлев И. С., Киль И. А.</i> ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ КАНАЛОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ.....	102

Секция 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

<i>Monich S., Liu Hang</i> THE USE OF SHOCK WAVE THERAPY IN SPORTS PRACTICE.....	104
<i>Абрамов С. А., Бринкевич Д. И., Просолович В. С., Колос В. В., Зубова О. А., Черный В. В., Вабищевич С. А., Вабищевич Н. В.</i> ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ФОТОРЕЗИСТА AZ nLOF 5510.....	106
<i>Абрамов С. А., Бринкевич Д. И., Просолович В. С., Колос В. В., Зубова О. А., Черный В. В.</i> СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТОВ ДЛЯ ОБРАТНОЙ ЛИТОГРАФИИ.....	108
<i>Амонов С. Т., Холов Ф. Б., Эмомов Н. Б., Луговой В. П., Мирзоалиев И.</i> ОБРАБОТКА САМОЦВЕТНЫХ КАМНЕЙ НА ГАЛТОВОЧНОМ БАРАБАНЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ	110
<i>Багдюн А. А., Соломахо В. Л.</i> КЛАССИФИКАЦИОННАЯ СХЕМА ИСТОЧНИКОВ ПОГРЕШНОСТЕЙ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ НАНОЧАСТИЦ, НАХОДЯЩИХСЯ НА ПОДЛОЖКЕ, В ЖИДКОСТИ И В ВОЗДУХЕ	112

<i>Балухо И. Н., Дудчик Ю. И., Жукова М. Н., Кольчевский Н. Н.</i> ЛЕТАЮЩАЯ ЛАБОРАТОРИЯ НА БАЗЕ КВАДРОКОПТЕРА DJI	114
<i>Балухо И. Н., Дудчик Ю. И., Жукова М. Н., Кольчевский Н. Н.</i> РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПОМОЩИ КВАДРОКОПТЕРА DJI PHANTOM	116
<i>Беляев Ю. В., Литвинович Г. С., Цикман И. М., Попков А. П.</i> КОМПЛЕКС «ИК-КАМЕЯ»	117
<i>Бразовская Н. Г., Бразовский К. С., Конев А. В.</i> СНИЖЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОИМПЕДАНСНЫХ СПЕКТРОВ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ	119
<i>Бусько В. Н.</i> ПРИМЕНЕНИЕ НЕОДИМОВЫХ МАГНИТОВ В УСТАНОВКЕ ДЛЯ МАЛОЦИКЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ	121
<i>Габец В. Л., Автушко Г. Л.</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К РАЗДЕЛУ «ОХРАНА ТРУДА» В ДИПЛОМНЫХ ПРОЕКТАХ СТУДЕНТОВ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОГО ФАКУЛЬТЕТА	124
<i>Гуринович А. А., Серенков П. С., Давыдова Е. А.</i> ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ СМК ДЛЯ ПРОЕКТНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ	127
<i>Гуринович А. А., Серенков П. С., Давыдова Е. А.</i> МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ КОММУНИКАЦИЙ В РАМКАХ СМК НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИИ ПОНЯТИЙ	129
<i>Давыдова Е. А., Чуешков В. В.</i> ПРОБЛЕМЫ ИНТЕГРАЦИИ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА ПРЕДПРИЯТИЙ	131
<i>Дубейко С. В., Коробко Ю. С.</i> МЕТОДИКА АТТЕСТАЦИИ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДАУРОВНЯ СМЯГЧЕНИЯ УДАРА	133
<i>Дубейко С. В., Коробко Ю. С.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ВЫСОТЫ ПАДЕНИЯ: УЧЕТ ВОЗРАСТНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕТЕЙ	135
<i>Жук Т. А.</i> СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ДЛЯ КОСМЕТИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ НА ОСНОВЕ СТАНДАРТА GMP	137
<i>Качанова Ю. И., Серенков П. С.</i> АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ РИСКА НЕКОРРЕКТНОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ В НАДЗОРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ	139
<i>Кубрин Д. С., Гомма М. А.</i> РОЛЬ КООРДИНАТНОГО КОНТРОЛЯ В РАЗВИТИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА	141
<i>Кубрин Д. С., Спесивцева Ю. Б.</i> АНАЛИЗ МЕТОДОВ НОРМИРОВАНИЯ ТОЧНОСТИ ПАРАМЕТРОВ	143
<i>Кулуев Р. Р.</i> ОСНОВНЫЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНОВЫХ ПРОДУКТОВ	145
<i>Кушнер М. В., Токарь О. В.</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОВЕРКИ С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЗАЦИИ	147
<i>Лисенков Б. Н.</i> ИЗМЕРЕНИЕ ЗАРЯДА ЗАТВОРА СИЛОВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ	149
<i>Лужинская А. И., Гомма М. А.</i> МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ОБЩЕСТВА	151
<i>Лужинская А. И., Гомма М. А.</i> ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ МЕТРОЛОГИИ	153
<i>Мигель А. С., Малый С. В., Черепанова Ю. В.</i> МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ ЭКГ-СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ДИФРАКЦИОННОГО ДЕСКРИПТОРА И ТЕХНОЛОГИЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ	155
<i>Митягина М. Н.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАЗРЫВОВ МОДИФИКАЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	157
<i>Монич С. Г., Иоффе К. В.</i> УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОЦЕНКИ СИЛЫ СЦЕПЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КЛЕЙКИХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ЛЕНТ С ПОДЛОЖКОЙ	159

<i>Назаренко П. Н.</i> АНАЛИЗ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОСТИ ТРАНСМИССОМЕТРАМИ	161
<i>Олешкевич А. Н., Сернов С. П., Просолович В. С., Лапчук Т. М., Пилипенко В. А., Ковальчук Н. С., Лапчук М. Ю.</i> ДИАГНОСТИКА МЕТОДОМ ЭПР СТАБИЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДИЭЛЕКТРИКА В СИСТЕМЕ Si-SiO ₂ В ПРОЦЕССЕ ЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ	163
<i>Панько В. В., Волынец О. А., Соколовский С. С.</i> АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ	165
<i>Рутковская Е. Н., Давыдова Е. А.</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ И НАДЗОРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА РЫНКАХ	167
<i>Селятыцкий А. А., Гомма М. А.</i> ВЛИЯНИЕ НЕСООТВЕТСТВИЯ ПРИНЯТОЙ МОДЕЛИ РЕАЛЬНОМУ ОБЪЕКТУ ИЗМЕРЕНИЯ НА ДОСТАВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ КООРДИНАТНОГО	169
<i>Серенков П. С., Романчук В. М., Бережных Е. В.</i> АЛГОРИТМ ЭКСПЕРТНОГО ОЦЕНИВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЕСОМОСТИ СВОЙСТВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ	171
<i>Серенков П. С., Романчук В. М., Бережных Е. В.</i> МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ СТЕПЕНИ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОСТИ СВОЙСТВ КОМПОНЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ	173
<i>Серенков П. С., Романчук В. М., Богуславский С. И.</i> НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ СЧЕТЧИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ЛЮБОЙ КОНСТРУКЦИИ	175
<i>Сернов С. П., Балохонов Д. В., Колонтаева Т. В., Тадэуш Н. Н., Федорцев Р. В., Коничева Л. М.</i> КОМПЛЕКС ДЛЯ СЕРТИФИКАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ К МЕХАНИЧЕСКОМУ ИЗНОСУ ПЛАСТМАССОВЫХ РАССЕЙВАТЕЛЕЙ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ ДОРОГИ МЕХАНИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ	177
<i>Сидоренко В. В., Габеев В. Л.</i> ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ НА КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ ПУТЕМ МИНИМИЗАЦИИ МАРШРУТА ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЩУПА	179
<i>Соколовский С. С., Мишуткин И. А.</i> ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ	181
<i>Спесивцева Ю. Б., Лужинская А. И.</i> МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ РАЗМЕРНОЙ ЦЕПИ	183
<i>Соломахо В. Л., Червяковская Н. Н.</i> ПРИНЦИП МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОСТИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ОПТИМАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦ ВЕЛИЧИН ПРИ ПОВЕРКЕ	185
<i>Фурс М. С., Серенков П. С.</i> СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА И КОНЦЕПЦИЯ «БЕРЕЖЛИВОЕ ПРОИЗВОДСТВО» ИНТЕГРИРОВАТЬ НЕЛЬЗЯ РАЗДЕЛЯТЬ?	187
<i>Цитович Б. В., Соломахо В. Л.</i> МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРОВ (ИНДИКАТОРОВ)	189

Секция 3. ФИЗИЧЕСКИЕ, ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ, МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

<i>Korzyuk V., Rudzko J., Kolyachko V.</i> CLASSICAL SOLUTION OF A MIXED PROBLEM OF THE LONGITUDINAL IMPACT ON A FINITE ROD WITH A NONCHARACTERISTIC BOUNDARY CONDITION	191
<i>Агаишков А. В.</i> ЛАЗЕРНЫЙ МИКРОСКОП ДЛЯ ВИДЕОРЕГИСТРАЦИИ СТРУКТУРЫ BLU-RAY ДИСКА	193

<i>Балухо И. Н., Дудчик Ю. И., Кольчевский Н. Н.</i> ЦВЕТОВАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ В РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА	195
<i>Бобученко Д. С.</i> ИЗМЕРЕНИЕ РАЗМЕРОВ МИКРОЧАСТИЦ ПО УГЛОВОМУ РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ИНТЕНСИВНОСТИ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	197
<i>Богдан П. С., Зайцева Е. Г., Степаненко Д. А., Билейчик А. А.</i> АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЧИСЛА ДИСКРЕТНЫХ ОТСЧЕТОВ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ СПЕКТРОФОТОМЕТРОВ	199
<i>Бокуть Л. В., Деев Н. А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ УСТРОЙСТВ ОБРАБОТКИ ДВОИЧНЫХ СИГНАЛОВ С МЕЖСИМВОЛЬНОЙ ППРЧ	201
<i>Борздов А. В., Борздов В. М., Буйновский Д. Н., Петлицкий А. Н.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛОТНОСТИ ТОКА В КРЕМНИЕВОЙ ДИОДНОЙ СТРУКТУРЕ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ-РЕКОМБИНАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ	203
<i>Бука А. В., Попов Р. Ю., Колонтаева Т. В., Шевченко А. А.</i> ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ОБЖИГЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО МАНГАНИТА ЛАНТАНА	205
<i>Бурак В. А., Осипов А. А.</i> ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ВОЛНОВОДА НА МАГНИТНУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИИ	207
<i>Гайдук Ю. С., Коробко Е. В., Радкевич Л. В., Котиков Д. А., Усенко А. Е., Паньков В. В.</i> ГЕКСАФЕРРИТ БАРИЯ КАК ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ НАПОЛНИТЕЛЬ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ	209
<i>Гацкевич Е. И.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ В СТРУКТУРАХ In/CdTe	211
<i>Гундина М. А., Кондратьева Н. А.</i> МЕТОД АССОЦИАЦИЙ В РАЗДЕЛАХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО И ИНТЕГРАЛЬНОГО ИСЧИСЛЕНИЯ	213
<i>Гусаков Г. А., Шаронов Г. В., Баран Л. В.</i> НАНОРАЗМЕРНАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖЕК ИЗ МОНОКРИСТАЛЛОВ НРНТ АЛМАЗА ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ	215
<i>Гусенников Е. Н., Юран С. И.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В ФИТОТРОНЕ	217
<i>Доронин К. И., Уманский А. С., Гоголинский К. В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УПРОЧНЕНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ СФЕРИЧЕСКИМ НАКОНЕЧНИКОМ	219
<i>Жевняк О. Г.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТИПА ПРОВОДИМОСТИ ПЛАВАЮЩЕГО ЗАТВОРА НА ПАРАЗИТНОЕ ТУННЕЛИРОВАНИЕ В ЭЛЕМЕНТАХ ФЛЕШ-ПАМЯТИ	221
<i>Ибрагимов Ш. Б., Мусакаев Р. Р., Умарова М. А., Турабов М.</i> ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В СТРУКТУРАХ ТИПА $M_3Ln(EO_4)_2$	223
<i>Константинов С. В., Зайков В. А., Комаров Ф. Ф., Лобанок М. В., Михаленок А. А., Романов И. А.</i> СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ $TiAlCuN$ ДЛЯ ТЕРМОРЕЗИСТИВНЫХ ДАТЧИКОВ	227
<i>Колонтаева Т. В., Сергеевич О. А., Потонейко А. В.</i> УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ СТЕКЛОВИДНЫХ ПОКРЫТИЙ	227
<i>Корякин С. В., Михаленок Е. В., Дубовик И. Н., Гайко М. И., Серокурова А. И.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ПОЛИРОВАЛЬНОЙ СУСПЕНЗИИ НА ПРОЦЕСС ХИМИКО- МЕХАНИЧЕСКОГО ПОЛИРОВАНИЯ ПОДЛОЖЕК SiC	229
<i>Ксенофонтов М. А., Васильева В. С., Выдумчик С. В., Гавриленко О. О., Горохов С. Л., Калашиников А. С., Павлюкевич Т. Г.</i> ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ЭПОКСИДНЫХ СИСТЕМ	231
<i>Кудина А. В., Франко Е. П., Барковская К. Н., Есьман Г. А.</i> ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС СВЧ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ	233

<i>Лабода Н. В., Тарасов Д. С., Самцов М. П., Воронай Е. С.</i> ЭТАЛОННЫЕ ОБРАЗЦЫ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКОГО ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА	235
<i>Луговой В. П., Попов Р. А.</i> УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОБРАБОТКИ ШАРИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ	237
<i>Назарчук К. А., Горанов И. В., Люцко К. С., Ластовский С. Б.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ НА ОСНОВЕ СПЛАВА 29НК	239
<i>Оджаев В. Б., Петлицкий А. Н., Просолович В. С., Ковальчук Н. С., Черный В. В., Шестовский Д. В., Янковский Ю. Н.</i> СТОКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛОВЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ С ДИЭЛЕКТРИКОМ, АЗОТИРОВАННЫМ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ	241
<i>Петухов И. Б.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАТЕЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИМПУЛЬСА В ПРОГРАММЕ LTspice	243
<i>Попов Р. Ю., Самсонова А. С., Пантелеенко Ф. И., Каврус И. В., Камлюк Т. В.</i> ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКОГО ВОЛЛАСТОНИТА ДЛЯ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	245
<i>Прусова И. В., Прихач Н. К., Ковгар В. В., Зиятдинова М. С.</i> ВЛИЯНИЕ ФТОРИРОВАНИЯ НА СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА Hg-СОДЕРЖАЩИХ ИТРИЙ-АЛЮМОБОРАТНЫХ СТЕКОЛ	247
<i>Рыжевич А. А., Балыкин И. В., Макаревич А. П., Железнякова Т. А.</i> ОТКЛОНЕНИЕ ОСИ БЕССЕЛЕВА СВЕТОВОГО ПУЧКА, ПРОШЕДШЕГО ЧЕРЕЗ ИМИТАТОР ТУРБУЛЕНТНОСТИ АТМОСФЕРЫ	249
<i>Савченко А. Л., Волкова О. Н., Сатторов С.</i> ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ НИТИНОЛОВЫХ ЭНДОПРОТЕЗОВ	251
<i>Савченко А. Л., Турочкин К. А., Сатторов С.</i> ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕНТГРАФТОВ ПРИ ХРАНЕНИИ В СИСТЕМЕ ДОСТАВКИ	253
<i>Савченко А. Л., Шумская А. П.</i> К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ФИЛЬТРА-ЛОВУШКИ	255
<i>Самцов М. П., Тарасов Д. С., Радько А. Е., Шевченко К. А., Курсанов А. А., Воронай Е. С.</i> ЛАЗЕРНЫЙ СПЕКТРОФЛУОРИМЕТР ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКОГО ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА	257
<i>Сандомирский С. Г., Яворский В. В., Антонюк В. Е., Солдатенков В. И.</i> РАСЧЕТ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ЗАГОТОВОК В УСТАНОВКЕ ДЛЯ ИХ СТАБИЛИЗАЦИИ	259
<i>Сандомирский С. Г.</i> ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНУТРЕННЕГО КОЭФФИЦИЕНТА РАЗМАГНИЧИВАНИЯ СТАЛЕЙ ПО ИХ МАГНИТНЫМ ПАРАМЕТРАМ	261
<i>Сергиевич О. А., Колонтаева Т. В., Богдан Е. О., Станчук А. А.</i> СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДНЫХ СТЕКОЛ	263
<i>Степаненко Д. А., Киндрук А. Н.</i> ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ СОСТАВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, СОДЕРЖАЩИХ КОЛЬЦЕВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ	265
<i>Сычик В. А., Глухманчук В. В., Уласюк М. М.</i> УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ	267
<i>Сычик В. А., Уласюк Н. Н.</i> ЭЛЕКТРЕТНЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ	270
<i>Сычик В. А., Уласюк Н. Н.</i> ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ВЛАЖНОСТИ	271
<i>Сычик В. А., Уласюк Н. Н.</i> ЭЛЕКТРОННЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ	274
<i>Телеш Е. В., Сафронов Н. В., Шевчик Е. В.</i> ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФТОРУГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ИОННО-ЛУЧЕВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ МИШЕНЕЙ	276

<i>Телеш Е. В., Шевчик Е. В., Курбако Е. Г., Перепечко Е. Ю.</i> ВЛИЯНИЕ СОСТАВА РАБОЧЕГО ГАЗА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФТОРУГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРЯМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ИОННЫХ ПУЧКОВ	278
<i>Филонова М. И., Козерук А.С., Андрушкевич И. В., Чернышенко Д. Ю.</i> КОМПЛЕКСНАЯ ОБРАБОТКА ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ С ПОЛНЫМИ СФЕРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ ..	280
<i>Франко Е. П., Смольская Т. С., Кудина А. В., Габец В. Л.</i> МЕТОДЫ ПОДГОНКИ УШНОГО ИМПЛАНТА К 3D-МОДЕЛИ ГОЛОВЫ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МРТ	283
<i>Франко Е. П., Кудина А. В., Друц Э. В., Есьман Г. А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОФОРЕЗА ДЛЯ ДОСТАВКИ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ВЕЩЕСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ	285
<i>Францкевич А. В., Францкевич Н. В., Мартинович В. А.</i> ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ УПАКОВКИ ГЛУБИННОГО ТОНКОГО СЛОЯ Si_xO_{1-x} НА ИЗМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ФОТО-ЭДС	287
<i>Францкевич А. В., Францкевич Н. В., Мартинович В. А.</i> МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИН КРЕМНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБРАБОТКИ В DC ПЛАЗМЕ ВОДОРОДА: ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ	289
<i>Чернявская С. В., Гундина М. А.</i> ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ WOLFRAMMATHEMATICA ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ ИНТЕГРАЛОВ	291
<i>Шевель Н. А., Бурак В. А.</i> ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ 3-D ПЕЧАТИ ДЛЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ УЗЛОВ ПЕЧАТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	293
<i>Юмашев К. В.</i> АП-КОНВЕРСИОННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ НАНОКРИСТАЛЛОВ АЛЮМИНАТА ГАДОЛИНИЯ, АКТИВИРОВАННОГО ИОНАМИ ИТТЕРБИЯ И ЕВРОПИЯ	295
<i>Юхновская О. В.</i> ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИНОРМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВЫБОРКИ	297
<i>Юхновская О. В., Гундина М. А., Пантелеев К. В.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ...	299

Секция 4. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

<i>Gorbachenya K., Volkova E., Maltsev V., Koporulina E., Kisel V.</i> CONTINUOUS WAVE AND PASSIVELY Q-SWITCHED Er,Yb:GdMgB ₅ O ₁₀ MICROCHIP LASERS	302
<i>Аладов А. В., Закгейм А. Л., Иванова А. Е., Черняков А. Е.</i> МОЩНЫЙ СВЕТОДИОДНЫЙ УФ-ИЗЛУЧАТЕЛЬ ДЛЯ АГРОФИЗИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ	304
<i>Алексеев В. А., Усольцев В. П., Шульмин Д. Н., Юран С. И.</i> ФОРМИРОВАНИЕ ЭТАЛОНОВ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ АВАРИЙНЫХ СБРОСОВ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ЗОНДИРОВАНИЕМ ПОТОКА ЖИДКОСТИ	306
<i>Алешкевич К. В., Артюхина Н. К., Кузнецик В. О.</i> АЛГОРИТМ РАСЧЕТА И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СКЛЕЕННОГО И НЕСКЛЕЕННОГО КОЛЛИМАТОРНЫХ ОБЪЕКТИВОВ АХРОМАТОВ	308
<i>Артюхина Н. К., Мамай Е. Ю., Филиппов Ф. А., Шанчук В. А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ПП ЗЕМАХ И ПЕРЕАППРОКСИМАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ	310
<i>Аскарова А. Я., Аскарров М. Р.</i> ВЛИЯНИЕ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ КОНВЕКЦИИ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ	312
<i>Белохвостик Е. В., Довжик В. Г., Кузнецик В. О.</i> ТЕПЛОВИЗИОННО-НОЧНОЙ МОНОКУЛЯР	313
<i>Беляев Ю. В., Литвинович Г. С., Горский Д. А., Котов Д. С., Страшко И. Б.</i> ИСПЫТАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК MWIR КАМЕРЫ С ЦЕЛЬЮ МОНИТОРИНГА ПОЖАРОВ	315
<i>Вакалов Д. С., Чихулина И. С., Кичук С. Н.</i> ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ Yb ³⁺ И Er ³⁺ НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ Yb, Er:YLuAG	317

<i>Гавриш С. В., Чиликина П. А.</i> ВЛИЯНИЕ ДЕГРАДАЦИИ РАЗРЯДНОЙ ОБОЛОЧКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ КСЕНОНОВОЙ ЛАМПЫ	319
<i>Епифанцев К. В., Родионов Д. С.</i> С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА И PZS-ЛИНЕЙКИ.....	321
<i>Ермалицкая К. Ф.</i> ДВУХИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ МИКРОКОЛИЧЕСТВ МЕТАЛЛОВ В ПОРИСТЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТРИЦАХ	323
<i>Жукова М. Н., Парфимович И. Д., Комаров Ф. Ф., Филиппович В. Ю.</i> АНТИБЛИКОВЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОПТИЧЕСКИХ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	325
<i>Зайцева А. А., Габеев В. Л.</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИБОРОВ НАБЛЮДЕНИЯ	327
<i>Зайцева А. А.</i> ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ПРИБОРАХ НАБЛЮДЕНИЯ	329
<i>Защепко П. А., Фёдорцев Р. В.</i> МЕТОДЫ АТМОСФЕРНОЙ КОРРЕКЦИИ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ	331
<i>Иванов В. И.</i> МЕТОД ЛАЗЕРНО-ЛОКАЦИОННОГО ПОЛУЧЕНИЯ 3D ПОРТРЕТОВ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ С КВАЗИНУЛЕВЫМ ОПТИЧЕСКИМ КОНТРАСТОМ ПОВЕРХНОСТИ	334
<i>Иванов В. И.</i> МЕТОД УВЕЛИЧЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ФЛЭШ-ЛИДАРА НА ОСНОВЕ МАТРИЧНОГО ФОТОДЕТЕКТОРА С НАКОПЛЕНИЕМ ЗАРЯДА ПИКСЕЛОВ	336
<i>Казаков В. И., Китаев В. В.</i> ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК В ЗАДАЧАХ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	339
<i>Казаков В. И., Рывкина Я. А., Параскун А. С.</i> ЛАЗЕРНЫЙ СЕНСОР ДЫМА И ТЕПЛООВОГО КОНВЕКЦИОННОГО ПОТОКА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ	341
<i>Канделинский С. Л., Ткаченко В. В., Утехин С. И.</i> РАСЧЕТ И ИСПРАВЛЕНИЕ АБЕРРАЦИЙ ЛАЗЕРНОЙ РАЗВЕРТЫВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ СКАНИРУЮЩИХ ПРИБОРОВ С ПАРАБОЛОИДНЫМ ОТРАЖАТЕЛЕМ	343
<i>Кисель В. Э., Горбаченя К. Н., Гоман В. И.</i> ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛА КОРРУНДА С ТИТАНОМ ПРИ ДИОДНОЙ НАКАЧКЕ В СПЕКТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ОКОЛО 444 НМ	345
<i>Кисель В. Э., Горбаченя К. Н., Гурецкий С. А., Кулешов Н. В.</i> ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛОВ ДВОЙНЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ВОЛЬФРАМАТОВ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ТРЕХВАЛЕНТНЫХ ИОНОВ ИТТЕРБИЯ В НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ	347
<i>Книга И. В., Маляревич А. М.</i> ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА МЕХАНИЗМА ВЫВЕРКИ КОЛЛИМАТОРА МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ	348
<i>Козерук А. С., Кузнечик В. О., Шевченко В., Якубович Т. С.</i> ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИНЗ МАЛОЙ ЖЕСТКОСТИ	350
<i>Кунцевич Б. Ф.</i> АКТИВНО-ИМПУЛЬСНАЯ СИСТЕМА ВИДЕНИЯ ДЛЯ НОЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТОМ В УСЛОВИЯХ МЕТЕОПОМЕХ	352
<i>Лазарчук А. И., Кисель В. Э., Ясюкевич А. С., Гоман В. И.</i> ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛАЗЕРА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА $\text{Yb:Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$	354
<i>Лазарчук А. И., Шишко Т. А., Ясюкевич А. С., Горбаченя К. Н., Кисель В. Э., Кулешов Н. В.</i> НЕПРЕРЫВНЫЙ ЛАЗЕР НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА Pr:YLF	356
<i>Луговский А. П., Мицкевич Е. Д., Гурский А. Л., Луговский А. А., Лапаник В. И., Тимофеев С. В.</i> ХИРАЛЬНЫЕ ДОБАВКИ ДЛЯ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТРИЦ НА ОСНОВЕ НАНОГЛИНЫ, ЛЕГИРОВАННОЙ ЧЕТВЕРТИЧНЫМИ АММОНИЕВЫМИ СОЛЯМИ	358

<i>Невдах В. В.</i> ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МОДЕЛИ КВАНТОВОГО ГАРМОНИЧЕСКОГО ОСЦИЛЛЯТОРА В КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ СВЕТА	360
<i>Олифер В. А., Савкова Е. Н., Фёдорцев Р. В.</i> КОНТРОЛЬ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТИ	362
<i>Поляков А. В., Ксенофонтов М. А.</i> КВАЗИРАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК	364
<i>Потапенко А. О.</i> ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ГАЗОРАЗРЯДНЫЙ ИСТОЧНИК УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СПЛОШНОГО СПЕКТРА	366
<i>Трофимов Ю. В., Лишик С. И., Сурвило Л. Н., Грушко Н. Н., Цвирко В. И., Комса О. С., Фан Ц.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУЧЕНИЯ СТЕКЛОЛЮМИНОФОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	368
<i>Шавель С. С., Горобец В. А., Буцук С. Б.</i> МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ТЕА ЛАЗЕР С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ЛИНИЙ ГЕНЕРАЦИИ	370
<i>Шаронов Г. В., Гасенкова И. В., Мухуров Н. И.</i> ШИРОКОАПЕРТУРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИК ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОВЫШЕННОЙ ЛУЧЕВОЙ ПРОЧНОСТЬЮ	372
<i>Шестак В. В., Микитчук К. Б., Чиж А. Л.</i> ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ЛАЗЕРНЫЙ ДИОДНЫЙ МОДУЛЬ С КИЛОГЕРЦОВОЙ МГНОВЕННОЙ ШИРИНОЙ ЛИНИИ	374
<i>Шилин А. А., Журавлев И. С., Киль И. А.</i> ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ КАНАЛОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	376
<i>Юмашев К. В., Гурецкий С. А., Карпинский Д. В., Труханова Е. Л., Герцова А. В.</i> ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ МОНОКЛИННЫХ КРИСТАЛЛОВ $Ku_xY_{1-x}(WO_4)_2$	378
<i>Якубович Т. С., Фёдорцев Р. В., Луговик А. Ю., Конопляников А. А.</i> ПОДБОР КОМПОНЕНТОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТРЕХОСЕВОГО МИКРООПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА	381
<i>Ясюкевич А. С., Колобкова Е. В., Кисель В. Э.</i> МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ ОТ ИОНОВ ИТТЕРБИЯ К ИОНАМ ТУЛИЯ ВО ФТОРФОСФАТНЫХ СТЕКЛАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИОНОВ ИТТЕРБИЯ	383

Секция 5. МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ И СИСТЕМЫ

<i>Горох Г. Г., Федосенко В. С., Чаевский В. В., Эм М., Ванг К., Таратын И. А.</i> ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ЧЕТВЕРНОГО МЕТАЛЛ-ОКСИДНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА Zr–Bi–Te–Fe–O И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК	386
<i>Анисович А. Г., Маркевич М. И., Щербакова Е. Н.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ФАЗЫ СИЛИЦИДА ТИТАНА	388
<i>Антонов М. С., Таратын И. А.</i> КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДАТЧИКА УГЛА НАКЛОНА НА ВИБРИРУЮЩЕМ ОСНОВАНИИ	390
<i>Антонов М. С., Реутская О. Г.</i> КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГАЗОВЫХ МИКРОСИСТЕМ	391
<i>Антонов М. С., Чижик С. А.</i> 3D-ПЕЧАТЬ НАНООБЪЕКТОВ	393
<i>Баранова А. С., Мельникова Г. Б., Сапсалёв Д. В., Толстая Т. Н., Жумназар Н. Н., Чижик С. А., Корольков И. В., Здоровец М. В.</i> МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПЭТФ ТМ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫМИ ДВУХСЛОЙНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ	395
<i>Жамойть А. Е., Шидловский А. Г., Климович Т. А., Дмитрачук А. Л.</i> МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ОТВЕРСТИЙ В ПОЛИИМИДЕ С КОНТРОЛИРУЕМЫМ УГЛОМ НАКЛОНА БОКОВЫХ СТенок В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТОПРИЕМНОЙ МАТРИЦЫ	397

<i>Климович Т. А., Жамойть А. Е., Занько А. И.</i> КОМПЕНСАЦИЯ НЕСООТВЕТСТВИЯ ПОКАЗАНИЙ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ НЕОХЛАЖДАЕМОГО МИКРОБОЛОМЕТРА	399
<i>Кудина А. В., Васильева А. А., Леонович А. Н., Габеев В. Л.</i> ДИАГНОСТИКА КАЧЕСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ДАТЧИКОВ И СИСТЕМ	401
<i>Лапицкая В. А., Насевич А.А., Довгаль М. И., Потонейко А.В., Щербакова Е. Н., Соловьев Я. А.</i> ВЛИЯНИЕ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СЛОЕВ СИЛИЦИДОВ Pt–Ni	403
<i>Реутская О. Г., Таратын И. А.</i> ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОГО ФОРМИРОВАНИЯ В РАЗРАБОТКЕ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ	405
<i>Сапожникова К. С., Щербакова Е. Н., Наливайко О. Ю.</i> УЗЛЫ И СИСТЕМЫ ВАКУУМНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ SNT SIGMA-400V	407
<i>Сапожникова К. С., Наливайко О. Ю., Щербакова Е. Н.</i> ВАКУУМНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ СЛОЕВ Ti, Ni, Ag, Cr, Cr ₂ O ₃	409
<i>Сапожникова К. С., Наливайко О. Ю., Щербакова Е. Н.</i> ВАКУУМНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ: НАЗНАЧЕНИЕ, ОСОБЕННОСТИ, УПРАВЛЕНИЕ	411
<i>Сапсальев Д. В., Мельникова Г. Б., Аксютин А. В., Баранова А. С., Толстая Т. Н., Котов Д. А., Чижик С. А.</i> ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СЛОИ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ЛЕНГМЮРА–БЛОДЖЕТТ ПОЛИВИНИЛКАРБАЗОЛА С НАНОЧАСТИЦАМИ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ ДАТЧИКОВ АНАЛИЗА СОДЕРЖАНИЯ КАТИОНОВ НИКЕЛЯ В ВОДЕ	413
<i>Трухан Р. Э., Маханёк А. А.¹, Лапицкая В. А., Чижик С. А., Кузнецова Д. И.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРОВ ВОДОЙ	415
<i>Филатов С. А., Кернасовский Ю. М., Таратын И. А., Долгих М. Н., Филатова О. С., Батырев Е. В.</i> МЭМС ДАТЧИК ТЕПЛОвого ПОТОКА С МЕТАПОВЕРХНОСТЬЮ	417
<i>Хабарова А. В., Лапицкая В. А., Чижик С. А., Трухан Р. Э., Николаев А. Л., Садырин Е. В., Айзикович С. М.</i> ИЗМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОСАЖДЕНИЯ КАК СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ ПОВЕРХНОСТИ ДВУХСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ AlN	419
<i>Хмарский П. А., Наумов А. О.</i> ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ КОМПАКТНОГО ВЫСОКОТОЧНОГО ИНЕРЦИАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ НА БАЗЕ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	421
<i>Филимонов А. В., Бондаренко В. Б., Кораблев В. В.</i> ХАОТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ НА ПОВЕРХНОСТИ ВЫРОЖДЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И В КОНТАКТАХ.....	423

Научное издание

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ – 2024

Материалы
17-й Международной научно-технической конференции

26–29 ноября 2024 года
Минск, Республика Беларусь

Ответственный за выпуск К. В. Пантелеев
Оформление и компьютерная верстка И. А. Париза, Я. А. Колядко, Н. Д. Коваленко

Подписано в печать 10.11.2024.
Формат 60x84 1/8. Бумага офсетная.
Офсетная печать. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 27,38. Уч.-изд. л. 21,41. Тираж 100. Заказ 4480.

Издатель и полиграфическое исполнение
Открытое акционерное общество «Типография Интегралполиграф»
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя и распространителя печатных
изданий №1572 от 15.12.2023 и №2/21 от 29.11.2013.
Ул. Корженевского, 16, пом. 111, 220108, г. Минск