

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

BELARUSIAN NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY

BELARUSIAN STATE INSTITUTE OF METROLOGY

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

INSTRUMENTATION ENGINEERING – 2023

**Proceedings
of the 16th International Scientific and Technical Conference**

November 15–17, 2023
Minsk, Republic of Belarus

**Minsk
BNTU
2023**

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

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

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ – 2023

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

15–17 ноября 2023 года
Минск, Республика Беларусь

**Минск
БНТУ
2023**

УДК 681.2(063)
ББК 34.9я431
П75

Редакционная коллегия:

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

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор Л. М. Лыньков;
д-р техн. наук, профессор А. В. Белый

Издание включает материалы 16-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2023» по направлениям: измерительные системы и приборы, технические средства безопасности; методы исследований и метрологическое обеспечение измерений; физические, физико-математические, материаловедческие и технологические основы приборостроения; оптико-электронные системы, лазерная техника и технологии.

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

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

UDC 616.12-073.97-71

A SYSTEM FOR AUTOMATIC PROCESSING, ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF ECG CHARACTERISTICS TO DETERMINE VARIOUS STATES OF CARDIAC ANOMALIES

Magrupov T., Talatov Y., Magrupova M.

Tashkent State Technical University

Tashkent, Uzbekistan

Abstract. A systematic approach to the joint solution of problems of automatic processing, analysis, classification and measurement of characteristics of electrocardiogram signals is proposed, which ensures the elimination of one-sided solutions and organize a complex system consisting of various methods and algorithms. Algorithms have been developed for the proposed stages: preliminary processing, feature extraction, analysis of electrocardiograms, training, classification and recognition of characteristics of electrocardiograms, cardiac abnormalities, amplitude-time characteristics, diagnosis of diseases. A joint solution of discrete wavelet transform methods, artificial neural network, digital Butterworth filter, fast Fourier transform, Engelse and Zeelenberg segmentation, etc. All software products were implemented and tested using the MATLAB and PYTHON programming system.

Key words: automatic processing, electrocardiogram, cardiovascular disease, systems approach, neural networks.

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ, АНАЛИЗА И КЛАССИФИКАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКГ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СОСТОЯНИЙ СЕРДЕЧНЫХ АНОМАЛИЙ

Магруппов Т., Талатов Я., Магруппова М.

Ташкентский государственный технический университет

Ташкент, Узбекистан

Аннотация. Предложен системный подход к совместному решению задач автоматической обработки, анализа, классификации и измерения характеристик сигналов электрокардиограмм, обеспечивающий исключение односторонних решений и организующий сложную систему, состоящую из различных методов и алгоритмов. Разработаны алгоритмы для предложенных этапов: предварительной обработки, выделения признаков, анализа электрокардиограмм, обучения, классификации и распознавания характеристик электрокардиограмм, нарушений сердечной деятельности, амплитудно-временных характеристик, диагностики заболеваний. Совместное решение методов дискретного вейвлет-преобразования, искусственной нейронной сети, цифрового фильтра Баттерворта, быстрого преобразования Фурье, сегментации Энгельса и Зеленберга и др. Все программные продукты были реализованы и протестированы с использованием системы программирования MATLAB и PYTHON.

Ключевые слова: автоматическая обработка данных, электрокардиограмма, сердечно-сосудистые заболевания, системный подход, нейронные сети.

Address for correspondence: Magrupov T., st. Universitetskaya, 2, Tashkent, Uzbekistan
e-mail: talatmt@rambler.ru

The development of computer, information and telecommunication technology around the world has opened new paths in the health care system during the prevention, diagnosis and treatment of diseases. Digitalization of healthcare is of great importance in conducting scientific and applied research and solving problems in this area.

In medical scientific research, during the registration, processing and analysis of biomedical signals (electrocardiogram, electroencephalogram, electromyogram, and others), there is a need to solve a large number of theoretical and practical problems due to the difficulty of formalizing and interpreting biomedical signals, which occupies the main and important place. This is due to the physiological origin of the signal, which determines its fuzziness, diversity, instability, unpredictability and tendency to numerous types of interference.

In medicine, among biosignals, the most informative and difficult to analyze and process is the electrocardiogram. When diagnosing various diseases (heart, neurological, oncological, etc.), the state of the cardiovascular system (CVS) is firstly determined. Correct and accurate processing and analysis of electrocardiograms allows timely and effective diagnosis of pathological changes in the cardiovascular system and determination of the type of cardiovascular diseases (CVD).

To date, many scientific and practical works have been published on the problems of CVD diagnostics, processing and analysis of the ECG signal [8–19]. On the basis of the analysis of existing works, it was concluded that the existing systems of automatic analysis do not make it possible to provide the required reliability of the results of diagnostics and diagnostic signs. Therefore, a systematic approach is required in

the development of effective methods and algorithms for ECG processing and analysis for accurate and correct determination of the time and frequency parameters of the signal.

The proposed system for automatic processing, analysis and classification of ECG characteristics makes it possible to exclude unilateral decisions and organize a complex system consisting of various methods.

To achieve this goal, the following tasks are proposed:

- examine medical information to obtain correct or accurate information about the electrical potentials that are to be measured, determining changes in the physiological process in the patient;

- filtering and elimination of signal distortions (noise and artifacts) in the ECG signal. They usually appear when the object moves incorrectly during ECG registration, interference in the power line, improper installation of the electrode, and others;

- extraction of signs of the ECG signal, i. e. diagnostic medical information, determination of R-peaks and QRS complexes in the ECG signal;

- analysis of the characteristics of electrocardiograms, which consist in calculating the main characteristics of the ECG, heart rate;

- classification of ECG characteristics to determine various conditions of the cardiac system: myocardial infarction, bradycardia, tachycardia, premature ventricular contraction, normal state;

- measurement of the amplitude-time characteristics of the ECG based on the developed device.

The solution of these problems requires a systematic approach and is represented by a complex of algorithmic, hardware and software tools [13–17].

The paper proposes the stages of a system for automatic processing, analysis, classification and measurement of ECG characteristics to determine various states of arrhythmias for accurate diagnosis of diseases of the cardiovascular system (Figure 1).

The solution to the automation problem begins with the input of raw data provided by the medical institution or the open MIT-BIH Arrhythmia database, which contains raw ECG data. As you know, the received ECG signal has noises and artifacts and may be in the frequency band in which the study is being conducted and will distort the characteristics of the ECG signal.

To obtain a useful ECG signal, first of all, it is necessary to implement the pre-processing stage of the ECG signal.

The ECG signal preprocessing stage is designed to extract medical information about the useful signal based on the initially specified noisy ECG signals from the database. To obtain the true state of the signal, you must first process the specified ECG signal. In this case, it is required not to eliminate vital signs, i. e. characteristics of the ECG signal. An algorithm for preprocessing the ECG signal is proposed. To

remove noise on the power line at 60 Hz, a Butterworth bandpass filter with a cutoff frequency of 59 Hz and 61 Hz is used. To do this, first the ECG signal is standardized and reduced to a mean value so that it is centered around zero. This is achieved using MATLAB.

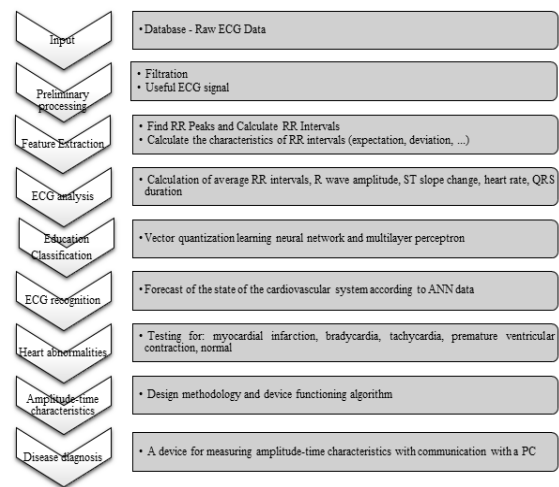


Figure 1 – Stages of a system for automatic processing, analysis, classification and measurement of ECG characteristics to identify various states of cardiac abnormalities

Two methods of removing baseline wandering are investigated and their effectiveness is determined. The results show that when filtering the ECG, the Butterworth filter retains the required characteristics in the filtered time domain. The wavelet transform sets the approximation coefficients to zero and hence the baseline offset is determined by low pass filtering. In this case, a Daubechies6 wavelet with a level of 8 was used because of its shape, similar to the ECG signals. To eliminate other broadband noises, a high-level discrete wavelet transform with maximum overlap is used. As a result, we will receive a useful ECG signal for further processing.

At the stage of feature extraction, the Q, R, S peaks of the QRS complex and the state of the ST segment tilt are detected based on the Pan-Tompkins method. On the basis of determining the number of peaks R and dividing it by a given time, the calculations of the RR interval, the amplitude of the R wave, the duration of the QRS complex and the slope of the ST segment, the heart rate and the detection of violations were made. Determined that the Pan-Tompkins method gives better results in relation to other methods.

At the next stage, the analysis of the characteristics of the electrocardiograms, the mean values were calculated: RR intervals, R wave amplitude, changes in ST slope, QRS complex duration, heart rate for each ECG beat.

At the next stage, the analysis of the characteristics of the electrocardiograms is carried out to calculate the average RR intervals, the R wave amplitude, changes in the ST slope, the duration of the QRS complex, the heart rate for each ECG beat.

The next step is to classify the characteristics of the ECG to identify cardiac abnormalities. For this, training is offered: vector quantization training neural network. They are used to classify ECGs and identify diseases: tachycardia, bradycardia, PSG, myocardial infarction, or no disease. In this case, each average value of five functions will represent five inputs in the vector quantization learning neural network. In accordance with the type of disease, output parameters or target classes are defined for each ECG signal function. To determine the appropriate target class, depending on the value of the functions, a decision tree is generated for each signal. After training and testing the vector quantization learning neural network, the classification model is evaluated. Generating a multilayer perceptron based neuroclassifier requires a labeled dataset that provides the correct class for each sample. The labeled dataset is divided into a training dataset with which the neural network is trained to obtain the actual classification of the data and a test dataset to evaluate the performance of the network. The minimum distance classifier will be used as the decision rules that will allow classifying the types of arrhythmias in the vector space. The essence of the method is that there are m reference vectors V_1, V_2, \dots, V_m in the n -dimensional feature space. Each vector serves as a reference (template) of its class and is defined as $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{in})$ corresponding to the class W_i .

The proposed neuroclassifier determines whether the input vector X belongs to the class W_i for which the distance between X and the reference vector V_i is minimal.

At the stage of ECG recognition, the forecast of the state of the cardiovascular system is carried out according to the data of an artificial neural network. Methods for preparing parameters of heart rate variability, which characterize a series of periods of heart contractions and are used as an indicator of the states of the cardiovascular system to determine the diagnostic functions of the ECG, are presented.

The stage of cardiac abnormalities is testing for: myocardial infarction, bradycardia, tachycardia, premature ventricular contraction, normal state based on the proposed algorithms of the vector quantization neural network learning and multilayer perceptron. The efficiency of the preferred neural network model with extended functions for the classification of ECG signals is calculated, taking into account various possible ECG states.

The stage of measuring the amplitude-time characteristics is implemented by the proposed device for measuring the amplitude-time characteristics of electrocardiographic biopotentials, electroencephalographic, electromyographic studies for monitoring the functional state of the patient and diagnosing pathologies her health, as well as improving the methods of their registration. Removing and analyzing the amplitude and time characteristics of the ECG signal is necessary for automatic interpretation of the ECG to identify pathological changes in the cardiovascular system.

The final stage determines the diagnosis of diseases using a device for measuring amplitude-time characteristics with communication with a PC. A design technique and an algorithm for the operation of the device are proposed.

For the organization of the system of automatic processing, analysis and classification of ECG characteristics and determination of various states of the cardiovascular system, it is important to use and jointly solve the methods of discrete wavelet transform, artificial neural network, digital Butterworth filter, fast Fourier transform, Engelse and Zeelenberg segmentation and other.

The algorithms developed on their basis have been implemented and will be improved using the MATLAB and PYTHON programming systems.

The proposed methods, algorithms, devices and software for automatic processing, analysis and classification of ECG characteristics to determine various states of the cardiovascular system are intended to analyze the heart rate and, accordingly, dynamic changes in the ECG. a type of heart abnormality. The proposed complex of algorithms and software system for processing, analysis, ECG classification and measurement of amplitude-time characteristics of biopotentials are new and have a fairly high sensitivity of 92 %, and the specificity was 89 %. Together, this shows a high indicator of the classification accuracy and is more acceptable for use in the diagnosis of cardiovascular diseases – arrhythmias. All software products were implemented and tested using the MATLAB and PYTHON programming systems.

References

1. Рангайян, Р.М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход / Р.М. Рангайян; под ред. А.П. Немирко. – М. : Физматлит, 2010. – 440 с.
2. Съём и обработка биоэлектрических сигналов: учебное пособие / К.В. Зайченко [и др.]. – СПб. : ГУАП, 2001. – 140 с.
3. Истомина, Т.В. Методы и средства обработки биоэлектрической информации / Дисс. д.т.н. – Пенза, 2002. – 172 с.
4. Калининченко, А.Н. Компьютерные методы автоматического анализа ЭКГ в системах кардиологического наблюдения / Дисс. д.т.н. – СПб., 2008. – 182 с.
5. Немирко, А.П. Математический анализ биомедицинских сигналов и данных / А.П. Немирко, Л.А. Манило, А.Н. Калининченко. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2017. – 248 с.
6. Сушкова, Л.Т. Автоматизация медико-биологических и экологических исследований на основе цифровой обработки информации / Дисс. д.т.н. – Владимир, 1999. – 137 с.
7. Pan, J. A real-time QRS detection algorithm / J. Pan, W.J. Tompkins // IEEE Trans. Biomed. Eng. – 1985. – Vol. 32. – P. 230–236.
8. Трешкур, Т.В. Электрокардиографические особенности автоматических идиовентрикулярных ритмов / Т.В. Трешкур // Вестник аритмологии. – 2005. – № 38.
9. ECG beat detection using filter banks / V.X. Afonso [et al.] // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 1999. – Vol. 46. – № 2. – P. 192–202.

10. Trahanias, P.E. An approach to QRS complex detection using mathematical morphology / P.E. Trahanias // IEEE Trans. Biomed. Eng. – 1993. – Vol. 40, №. 2. – P. 201–205.

11. Леонова, А.В. Модификация алгоритма распознавания QRS комплексов в реальном времени Пана-Томпкинса / А.В. Леонова, А.А. Агейченко // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2. – С. 72–76.

12. Юлдашев, М. Многоуровневая интеллектуальная система удаленного мониторинга состояния здоровья людей с хроническими заболеваниями / М. Юлдашев, Е.А. Пустозеров, А.А. Анисимов // Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы. – 2016. – № 5. – С. 2–8.

13. Magrupov, T.M. ECG processing and analysis technique based on neural network learning vector quantization / T.M. Magrupov, Sh.K. Nematov, Y.T. Talatov // Chemical Technology, Control and Management. – 2020. – Iss. 4, Article 3. – P. 15–22.

14. Talatov, Y.T. Algorithmic and software analysis and processing of ECG signals / Y.T. Talatov, T.M. Magrupov // Conference Proceedings. SIBIRCON 2019 – International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences, Proceedings. – 2019. – P. 403–406.

15. A Technique for Classifying the ECG Signal into Various Possible States of the Cardiovascular System / Y.T. Talatov [et al.] // Conference Proceedings. 2020 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEExPolytech). – 2020. – P. 127–131.

16. Talatov, Y.T. A Device for Measuring of Frequency Response Function of Biopotentials / Y.T. Talatov, T. Magrupov, A. Radjabov // Conference Proceedings. SIBIRCON 2019 – International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences, Proceedings. – 2019. – P. 7–10.

17. Methodology for processing and analysis of diagnostic indicators electrocardiogram based on Labview / Y.T. Talatov [et al.] // 2020 International Conference on Information Science and Communications Technologies, ICISCT 2020. – 2020. – P. 9351478.

18. An ECG Processing and Analysis Technique Based on Neural Network / Y.T. Talatov [et al.] // International Conference on Information Science and Communications Technologies, ICISCT 2020. – 2020. – P. 9351478.

19. Talatov, Y.T. A method for classifying ecg signals with different possible states on a multilayer perceptron / Y.T. Talatov, Sh.K. Nematov // Technical Science and Innovation. – 2020. – № 4. – P. 71–79.

УДК 531.383

ПОГРЕШНОСТИ БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Матвеев В.В.

*ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация*

Аннотация. Рассматриваются погрешности бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС), вызванные инструментальными погрешностями датчиков первичной информации. Приводятся соотношения для оценки средних квадратических отклонений погрешностей БИНС, вызванных шумом гироскопов и акселерометров. Даны оценки погрешностей БИНС на коротком интервале времени для уровня шума микромеханических датчиков первичной информации.

Ключевые слова: бесплатформенная инерциальная навигационная система, гироскоп, акселерометр, погрешность.

ERRORS OF STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS

Matveev V.V.

*Tula State University
Tula, Russian Federation*

Abstract. Errors in strapdown inertial navigation systems (SINS) caused by instrumental errors in primary information sensors are considered. Relations are given for estimating the standard deviations of SINS errors caused by the noise of gyroscopes and accelerometers. Estimates of SINS errors over a short time interval are given for the noise level of micromechanical sensors.

Key words: strapdown inertial navigation system, gyroscope, accelerometer, error.

*Адрес для переписки: Матвеев В.В., пр. Ленина, 95, г. Тула, 300012, Российская Федерация
e-mail: matweew.valery@yandex.ru*

Введение. Сегодня не вызывает сомнений вопрос о перспективности использования бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) на подвижных объектах наземного, морского и воздушного базирования [1; 2]. БИНС не требуют информации о магнитном поле Земли, местоположении небесных светил, ветровых и морских течений. Координаты местоположения

подвижного объекта в БИНС определяются автономно на основе показаний гироскопов и акселерометров. Основная идея инерциальной навигации – это двойное интегрирование измеренных акселерометрами ускорений. Гироскопы служат для обеспечения информацией об угловой ориентации измерительных осей акселерометров путем численного интегрирования кинематических уравнений.

Наряду с несомненными преимуществами БИНС по сравнению с другими неавтономными средствами навигации, существенным их недостатком является накопление погрешностей с течением времени. Выходные сигналы датчиков первичной информации (ДПИ) содержат различного рода инструментальные погрешности (шум, нестабильность масштабного коэффициента, смещение нулевого сигнала и др.), которые приводят к искажениям в измерении угловых скоростей и ускорений подвижного объекта, что в конечном счете сказывается на точности решения задач ориентации и навигации. Обзору погрешностей БИНС и посвящен настоящий доклад.

Влияние шума датчиков. Для характеристики шума гироскопов обычно задается величина ARW (*Angle Random Walk* – случайное блуждание угла) с размерностью $[^\circ/\sqrt{ч}]$ или $[^\circ/\sqrt{с}]$, имеющая смысл квадратного корня из спектральной плотности белого шума. Шум акселерометров соответственно характеризуют величиной VRW (*Velocity Random Walk* – случайное блуждание скорости) с размерностью $[м/с^{3/2}]$.

Погрешности БИНС в определении параметров ориентации и навигации, вызванные шумом гироскопов можно оценить по следующим зависимостям [3; 4]:

$$\sigma_{\Delta\alpha}^{gyro}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} ARW \sqrt{t + \frac{\sin 2\omega_0 t}{2\omega_0}}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\Delta V}^{gyro}(t) = \frac{g}{\sqrt{2}\omega_0} ARW \sqrt{t - \frac{\sin 2\omega_0 t}{2\omega_0}}, \quad (2)$$

$$\sigma_{\Delta X}^{gyro}(t) = \frac{g \cdot ARW}{\omega_0^2} \sqrt{\frac{3t}{2} - \frac{2 \sin \omega_0 t}{\omega_0} + \frac{\sin 2\omega_0 t}{4\omega_0}}, \quad (3)$$

где $\omega_0 = \sqrt{g/R}$ – частота Шулера (если принять $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, $R = 6371000 \text{ м}$, то $\omega_0 = 0,00124 \text{ с}^{-1}$); $\sigma_{\Delta\alpha}^{gyro}(t)$, $\sigma_{\Delta V}^{gyro}(t)$, $\sigma_{\Delta X}^{gyro}(t)$ – СКО погрешностей БИНС в определении угловой ориентации, скорости и координаты соответственно.

Влияние шума акселерометров можно оценить по следующим зависимостям:

$$\sigma_{\Delta\theta}^{acc}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}R\omega_0} VRW \sqrt{t - \frac{\sin 2\omega_0 t}{2\omega_0}}, \quad (4)$$

$$\sigma_{\Delta V}^{acc}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} VRW \sqrt{t + \frac{\sin 2\omega_0 t}{2\omega_0}}, \quad (5)$$

$$\sigma_{\Delta X}^{acc}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}\omega_0} VRW \sqrt{t - \frac{\sin 2\omega_0 t}{2\omega_0}}, \quad (6)$$

где $\sigma_{\Delta\theta}^{acc}(t)$, $\sigma_{\Delta V}^{acc}(t)$, $\sigma_{\Delta X}^{acc}(t)$ – СКО погрешностей БИНС в определении угловой ориентации, скорости и координаты соответственно.

Если рассматривается вариант создания БИНС на датчиках первичной информации низкого класса точности, то вряд ли придется надеяться на

длительный автономный режим работы и учитывать шулеровские, а тем более суточные колебания погрешностей. В этом случае зависимости (1)–(6) можно рассмотреть на коротком интервале времени (до 10 мин) [2]:

$$\sigma_{\Delta\alpha}^{gyro}(t) \approx ARW \sqrt{t}, \quad \sigma_{\Delta\alpha}^{acc}(t) \approx \frac{1}{\sqrt{3}R} VRW \cdot t^{3/2}, \quad (7)$$

$$\sigma_{\Delta V}^{gyro}(t) \approx \frac{g \cdot ARW}{\sqrt{3}} t^{3/2}, \quad \sigma_{\Delta V}^{acc}(t) \approx VRW \sqrt{t}, \quad (8)$$

$$\sigma_{\Delta X}^{gyro}(t) \approx \frac{g \cdot ARW}{2\sqrt{5}} t^{5/2}, \quad \sigma_{\Delta X}^{acc}(t) \approx \frac{VRW}{\sqrt{3}} \cdot t^{3/2}. \quad (9)$$

Например, микромеханические гироскопы семейства *Analog Devices* имеют шум $ARW = 0,05^\circ / \sqrt{с}$ ($8,727 \cdot 10^{-4} \text{ рад}/\sqrt{с}$), тогда за время 3 мин, будет накоплена погрешность по углам ориентации

$$\sigma_{\alpha}^{gyro}(180) = 0,05 \sqrt{180} = 0,671^\circ \quad (1\sigma).$$

В соответствии с приведенными выше формулами СКО погрешностей БИНС по скорости и пройденному пути имеют значения:

$$\sigma_{\Delta V}^{gyro}(180) = \frac{9,81}{\sqrt{3}} 8,727 \cdot 10^{-4} \cdot 180^{3/2} = 11,9 \text{ м/с},$$

$$\sigma_{\Delta X}^{gyro}(180) = \frac{9,81}{2\sqrt{5}} 8,727 \cdot 10^{-4} \cdot 180^{\frac{5}{2}} = 832,1 \text{ м}.$$

Оценим погрешности БИНС, например для микромеханического акселерометра *ADIS16003* с уровнем шума $110 \text{ мкг}/\sqrt{Гц} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^{3/2}$. В этом случае СКО погрешностей БИНС по скорости и координате будут иметь следующие значения:

$$\sigma_{\Delta V}^{acc}(t) = 1,1 \cdot 10^{-3} \sqrt{180} = 0,015 \text{ м/с},$$

$$\sigma_{\Delta X}^{acc}(180) \approx \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot 180^{\frac{3}{2}} = 1,534 \text{ м}.$$

Данные оценки показывают, что влияние шума гироскопов на погрешности БИНС по координатам может быть существенно. Шум акселерометров в целом оказывает меньшее влияние. Для определения максимальных значений погрешностей БИНС при гауссовом распределении, полученные значения необходимо снабдить множителем 3, в соответствии с правилом «трех сигм».

Влияние систематических погрешностей

Систематические погрешности (*Systematic error*) данного акселерометра $\Delta\omega_{\text{sys}}$ (гироскопа $\Delta\omega_{\text{sys}}$), как правило, будут отличаться от систематической погрешности другого экземпляра акселерометра (гироскопа) этого же типа, либо отличаться от запуска к запуску. Вследствие чего для группы однотипных акселерометров (гироскопов) систематические погрешности зачастую рассматриваются как случайные величины со среднеквадратическими отклонениями $\sigma_{\text{sys}}^{acc}$ и

$\sigma_{\text{сист}}^{\text{gyro}}$. Если $\Delta a_{\text{сист}}$, $\Delta \omega_{\text{сист}}$ – постоянные в данном запуске систематические погрешности гироскопов и акселерометров, то погрешности БИНС могут быть оценены по зависимостям

$$\Delta \alpha = \frac{\Delta a_{\text{сист}}}{g} (1 - \cos \omega_0 t) + \frac{\Delta \omega_{\text{сист}}}{\omega_0} \sin \omega_0 t, \quad (10)$$

$$\Delta V = \frac{\Delta a_{\text{сист}}}{\omega_0} \sin \omega_0 t + R \cdot \Delta \omega_{\text{сист}} (\cos \omega_0 t - 1), \quad (11)$$

$$\Delta X = R \left(\frac{\Delta a_{\text{сист}} (1 - \cos \omega_0 t)}{g} + \Delta \omega_{\text{сист}} \left(\frac{\sin \omega_0 t}{\omega_0} - t \right) \right). \quad (12)$$

Соотношения (10)–(12) показывают, что погрешности БИНС носят характер колебаний с частотой Шулера. Соотношение (12) содержит, так называемый, «вековой» член, приводящий к неограниченному росту погрешностей БИНС в определении координат. При необходимости, путем разложения в степенные ряды зависимости (10)–(12), можно получить оценки погрешностей БИНС на коротком интервале времени.

УДК 538.9; 537.6/8; 544.2; 535; 621.37; 621.38

ПЕРСПЕКТИВЫ III-НИТРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ИХ РАЗВИТИЕ В БЕЛАРУСИ

Луценко Е.В.

*Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Представлены последние достижения в области роста слоев и гетероструктур III-нитридов, а также создания на их основе различных устройств опто-, СВЧ и силовой электроники. Рассматривается текущий уровень таких разработок в Беларуси. Обсуждаются пути развития и перспективы III-нитридной силовой и СВЧ электроники, УФ оптоэлектроники, лазеров, фотоники и акустооптики, возможности сопряжения их с традиционной кремниевой микроэлектроникой.

Ключевые слова: III-нитрид (GaN, AlN, InN), молекулярно-лучевая эпитаксия, УФ-светодиоды, УФ-фотодетекторы, транзисторы.

PROSPECTS FOR III-NITRIDE TECHNOLOGIES AND THEIR DEVELOPMENT IN BELARUS

Lutsenko E.V.

*B.I. Stepanov Institute of Physics, NASB
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The latest achievements in the field of growth of layers and heterostructures of III-nitrides, as well as the creation of various opto-, microwave and power electronics devices based on them, are presented. The current level of such developments in Belarus is considered. The development paths and prospects of III-nitride power and microwave electronics, UV optoelectronics, lasers, photonics and acousto-optics, and the possibility of pairing them with traditional silicon microelectronics are discussed.

Key words: III-nitride (GaN, AlN, InN), molecular beam epitaxy, UV LEDs, UV photodetectors, transistors.

*Адрес для переписки: Луценко Е.В., пр. Независимости, 68-2, г. Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: e.lutsenko@ifanbel.bas-net.by*

Развитие эпитаксиальных технологий тонких пленок III-нитридов (GaN, AlN, InN) привело к впечатляющему экономическому эффекту. К настоящему времени практически все освещение осуществляется с помощью «белых» светодиодов, содержащих «синий» [1] светодиодный

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме FEWG-2022-0002.

Литература

1. Матвеев, В.В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем: учеб. пособие для студ. Вузов / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов; под общ. ред. В.Я. Распопова; Гос. науч. центр РФ ОАО Концерн ЦНИИ «Электроприбор». – СПб, 2009. – 280 с.
2. Навигация летательных аппаратов в околосреднем пространстве / Л.И. Августов [и др.]; под ред. проф. Г.И. Джанжгавы. – М. : ООО «Научтехлитиздат», 2015. – 592 с.
3. Матвеев В.В. Инженерный анализ погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы / В.В. Матвеев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 9 (2). – С. 251–267.
4. Матвеев, В.В. Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации на МЭМС-датчиках: учеб. Пособие / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2017. – 225 с.

кристалл и желтый люминофор для получения белого цвета. Именно «за изобретение эффективных синих светодиодов, которые позволили создать яркие и энергосберегающие источники белого света» т. е. фактически за то, какое влияние это оказало на общество, и были удостоены в 2014

году Нобелевской премии трое японских ученых И. Акасаки, Х. Аmano и Ш. Накамура.

Однако «революция», произошедшая в освещении, не единственное достижение эпитаксиальных технологий III-нитридов. В настоящее время происходит вторая «революция» (рисунок 1) в источниках электропитания (первая была обусловлена применением транзисторов).

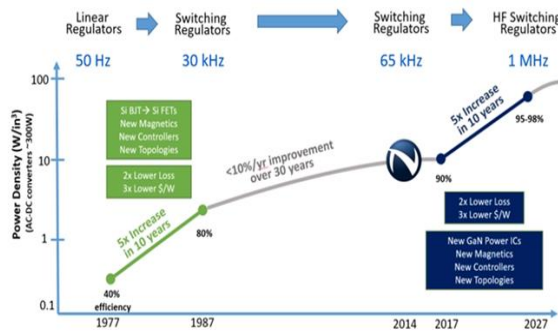


Рисунок 1 – Плотность мощности источников электропитания [2] (1977–1987 первая, 2017–2027 вторая революция в силовой электронике)

Увеличение быстродействия GaN транзисторов более чем в 100 раз (по сравнению с кремниевыми транзисторами) позволяет в разы уменьшить массу и габариты источников питания и контролеров электродвигателей за счет уменьшения электрических потерь, массы и габаритов индуктивностей и емкостей. В настоящее время плотности мощности вторичных источников электропитания уже достигают величин более 300 Вт/см^3 (5130 W/in^3) [3].

Именно задачами разработки молекулярно-пучковой эпитаксии (рисунок 2) транзисторных гетероструктур на основе GaN в настоящее время занимается Институт физики НАН Беларуси.



Рисунок 2 – Установка молекулярно-пучковой эпитаксии нитридных гетероструктур Института физики НАН Беларуси

Институт физики НАН Беларуси совместно с ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» а также ОАО «Минский НИИ Радиоматериалов» разрабатывает новое поколение силовых транзисторов и мощных СВЧ

транзисторов на основе GaN. На этом пути Институт физики достигнуты впечатляющие результаты. Созданы AlGaN/GaN гетероструктуры словым сопротивлением двумерного газа 220 Ом/кВ ., что почти в 2 раза меньше, чем в коммерческих образцах гетероструктур (рисунок 3).

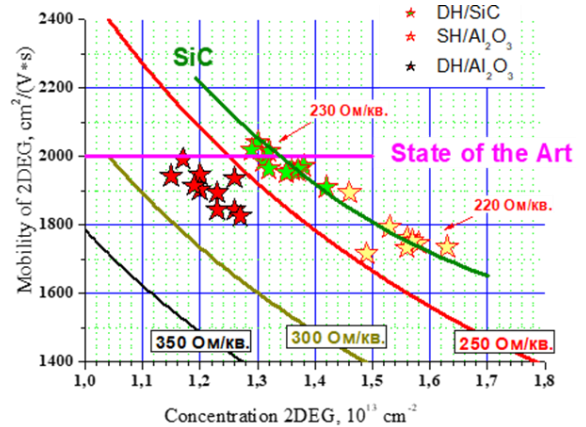


Рисунок 3 – Подвижность двумерного электронного газа транзисторных гетероструктур AlGaN/GaN в зависимости от концентрации

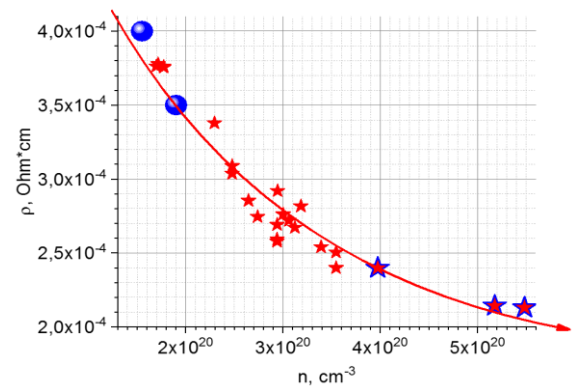


Рисунок 4 – Удельная проводимость эпитаксиальных слоев n^{++} типа GaN:Si в зависимости от концентрации электронов

Разработана эпитаксия контактных слоев n^{++} - типа GaN:Si с концентрацией электронов до $5,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и удельным сопротивлением $\sim 2 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}$, что является лучшим в мире результатом для МПЭ (рисунок 4). Этого удалось добиться благодаря оптимизации условий роста из структурных, электрических и фотолюминесцентных измерений. В частности, показано, что понижение температуры роста GaN:Si приводит к уменьшению самокомпенсации примесных доноров Si собственными дефектами и увеличению максимально достижимых концентраций электронов с уменьшением удельной проводимости.

Однако III-нитриды – это еще и изменение ширины запрещенной зоны в системе AlN-GaN-InN от 6,2 до 0,7 эВ, то есть гетероструктуры на твердых растворах перекрывают весь видимый, ультрафиолетовый и ближний инфракрасный диапазон спектра. Большие усилия в мире сейчас

прикладываются к ультрафиолетовым фотоприемникам светодиодам и лазерам. Институт физики НАН Беларуси также начал работы в этой области совместно с ОАО «ИНТЕГРАЛ», ведутся работы и по созданию сверхярких источников излучения совместно с ЦСОТ НАН Беларуси.

Обсуждаются пути развития и перспективы III-нитридной силовой и СВЧ электроники, УФ оптоэлектроники, лазеров, фотоники и акустооптики, возможности сопряжения их с традиционной кремниевой микроэлектроникой.

Литература

1. Нобелевская премия по физике 2014 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2014/summary/>.
2. Oliver. Fast-Forward to the GaN Data Center [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.powerelectronicsnews.com/fast-forward-to-the-gan-data-center/>.
3. A. Lidow. Efficient Power Conversion [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.datacenterdynamics.com/en/opinions/gan-technology-drives-power-density-in-data-centers/>.

УДК 006.91

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭТАЛОННОЙ БАЗЫ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Козак Ю.В.

*РУП «Белорусский Государственный институт метрологии»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. На сегодняшний день значительные ресурсы вкладываются в разработку, модернизацию и поддержание на высоком техническом уровне эталонной базы Республики Беларусь и это важнейшая функция БелГИМ, как национального метрологического института. Постоянное развитие, участие в международных сличениях национальных эталонов, государственных научно-технических программах, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах позволяет в полной мере отвечать современным запросам нашей промышленности.

Ключевые слова: эталонная база Республики Беларусь, измерения, метрологическое обеспечение.

CURRENT STATE AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF THE ETALON BASE OF THE REPUBLIC OF BELARUS

Kozak Yu.V.

*Republican Unitary Enterprise "Belarusian State Institute of Metrology"
Minsk, Republic of Belarus*

Annotation. Today, significant resources are invested in the development, modernization and maintenance of the reference base of the Republic of Belarus at a high technical level, and this is the most important function of BelGIM as a national metrological institute. Constant development, participation in international comparisons of national standards, state scientific and technical programs, research and development work allows us to fully meet the modern needs of our industry.

Key words: etalon base of the Republic of Belarus, measurements, metrological support.

*Адрес для переписки: Козак Ю.В., Старовиленский тракт, 93, г. Минск, 220053, Республика Беларусь
e-mail: info@belgim.by*

В 1924 г. была основана Белорусская палата мер и весов. 100 лет – это временной рубеж, за которым можно подвести черту, приостановиться, оценить, насколько продвинулась метрология в целом, начиная с измерений длины, массы, времени заканчивая высокоточными измерениями с использованием сложного, высокотехнологичного исследовательского оборудования. На сегодняшний день значительные ресурсы вкладываются в разработку, модернизацию и поддержание на высоком техническом уровне эталонной базы Республики Беларусь и это важнейшая функция БелГИМ, как национального метрологического института. БелГИМ имеет статус научной организации и является признанным на международном уровне научно-исследовательским, методическим

и практическим центром с современной технической базой, обеспечивающей проведение измерений на наивысшем уровне точности в республике. По состоянию на 5 октября 2023 года опубликованы данные о наилучших калибровочных и измерительных возможностях, которые включают 301 СМС-строку в различных областях измерений.

БелГИМ так же является головной организацией-исполнителем подпрограммы «Эталоны Беларуси», осуществляет ее сопровождение. Подпрограмма «Эталоны Беларуси» 2021–2025 годы является логическим развитием успешно выполненных:

- ГНТП «Стандарты», 1996–1997 годы и на период до 2000 года;
- ГНТП «Эталоны Беларуси», 2001–2003 годы;

- подпрограммы «Эталоны Беларуси» ГНТП «Приборостроение», 2004–2005 годы;
- подпрограммы «Эталоны Беларуси» ГНТП «Эталоны и научные приборы», 2006–2010 годы;
- подпрограммы «Эталоны Беларуси» ГНТП «Эталоны и научные приборы», 2011–2015 годы;
- подпрограммы «Эталоны Беларуси» ГНТП «Эталоны и научные приборы», 2016–2020 годы.

Текущая подпрограмма включает 11 заданий по созданию национальных эталонов, 10 заданий по модернизации национальных эталонов. Задания подпрограммы выполняются как БелГИМ, так и другими научными учреждениями республики: Белорусским государственным университетом информатики и радиоэлектроники, институтом физики имени Б.И. Степанова и институтом прикладной физики Национальной академии наук.

В рамках текущей подпрограммы уже выполнены задания по созданию и оснащению лаборатории эталонов в нанометровом диапазоне измерений, созданию эталонного комплекса метрологической оценки средств измерений параметров дисперсных сред, модернизирован Национальный эталон единицы электрической мощности. В ближайшее полугодие будут завершены работы по созданию Национального эталона единицы импульсного электрического напряжения и Национального эталона единицы давления в области измерения вакуума.

Институтом будут продолжены работы по разработке новых национальных эталонов единиц величин на уровне, позволяющем обеспечивать и соответствовать потребностям социально-экономического развития республики, а также обеспечению метрологической прослеживаемости до Международной системы единиц (СИ). После завершения текущей подпрограммы «Эталоны Беларуси» планируется довести количество национальных эталонов до 73. БелГИМ является хранителем 57 национальных эталонов единиц величин, которые позволяют передавать единицу величины средствам измерений, применяемым в военной, энергетической, машиностроительной, электронной, приборостроительной, пищевой, медицинской и другим отраслям экономики.

Постоянное развитие, участие в международных сличениях национальных эталонов, государственных научно-технических программах, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах позволяет в полной мере отвечать современным запросам нашей промышленности.

За прошедшие 100 лет со дня основания Белорусской палаты мер и весов можно с уверенностью сказать, что метрология присутствует в каждой области жизнедеятельности и это не дает нам права останавливаться на достигнутом, а двигаться только вперед!

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

UDC 504.05

DETECTING RADIATION CONTAMINATION WITH QUADCOPTER

**Balukho I.N.¹, Miritsky B.L.², Intyakov A.N.², Koltsov I.V.²,
Dudchik Y.I.¹, Kolchevsky N.N.¹**

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

²*RADATEH Co., Ltd
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The radiation monitoring system is proposed to include ground-based stationary measuring complexes, mobile – wearable, and UAV-based complexes united into a single measuring system with the functions of data accumulation and analysis, display of radiation situation in real time. Radiation monitoring system should provide detection of stationary and mobile sources of ionising radiation, provide spatial scaling of measurement information, implement mechanisms of warning and notification of emergency events through online services and mobile communication.

Keywords: radiation monitoring, UAV.

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ КВАДРОКОПТЕРА

**Балухо И.Н.¹, Мирицкий Б.Л.², Интяков А.Н.², Кольцов И.В.²,
Дудчик Ю.И.¹, Кольчевский Н.Н.¹**

¹*НИИ Прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ*

²*ООО «Радатех»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Предлагается система радиационного мониторинга, включающая наземные стационарные измерительные комплексы, мобильные – носимые, и комплексы на базе БПЛА, объединенные в единую измерительную систему с функциями накопления и анализа данных, отображения радиационной обстановки в режиме реального времени. Система радиационного мониторинга должна обеспечивать обнаружение стационарных и подвижных источников ионизирующего излучения, обеспечивать пространственное масштабирование измерительной информации, реализовывать механизмы предупреждения и оповещения о чрезвычайных событиях посредством онлайн сервисов и мобильной связи.

Ключевые слова: радиационный мониторинг, БПЛА.

*Address for correspondence: Kolchevsky N.N., Kurchatova str. 7–403, 220045, Minsk, Republic of Belarus
e-mail: kolchevsky@bsu.by, radateh.info@gmail.com*

Radiation monitoring in the Republic of Belarus is based on a network of stationary measuring complexes. The objects of control are: atmospheric air, soil, surface and ground waters. In the area of BelNPP the automated system of radiation monitoring of the Ministry of Natural Resources and Environment has been functioning since 2017. In the Republic of Belarus, a radiation monitoring system has been established and is functioning as an integral part of the national environmental monitoring system.

The results of radiation monitoring are displayed online in the mode of statistical averages (<https://chernobyl.mchs.gov.by/>, <https://www.nsmos.by/content/180.html>) and in real time (<https://rad.org.by/>, <https://remap.jrc.ec.europa.eu/Advanced.aspx>). The frequency of measurements depends on the technical capabilities of the measuring station, regulations, the object of control and is, for example, for surface water, usually 4 measurements per year. Low frequency of measurements and point

in time, local in space character of measurements are the main disadvantages of existing systems.

It is proposed to use an integrated system for monitoring radiation contamination using unmanned aerial vehicles and a system for storing, analysing and displaying data online in real time (Figure 1).

Figure 1 shows stationary measurement systems, mobile laboratories, mobile measurement systems and flying measurement laboratories. Stationary measurement systems use wired and wireless measurement data transmission channels. Mobile laboratories, mobile measurement systems and flying measurement systems use wireless data transmission systems and indicator devices for data display. The following communication channels are used for wireless transmission of measurement data: radio channel, with transmission range over 300 metres; Wi-Fi channel, with transmission range up to 100 metres and IR, Bluetooth, with distances of 5–10 metres, cellular communication (internet, sms, IoT).

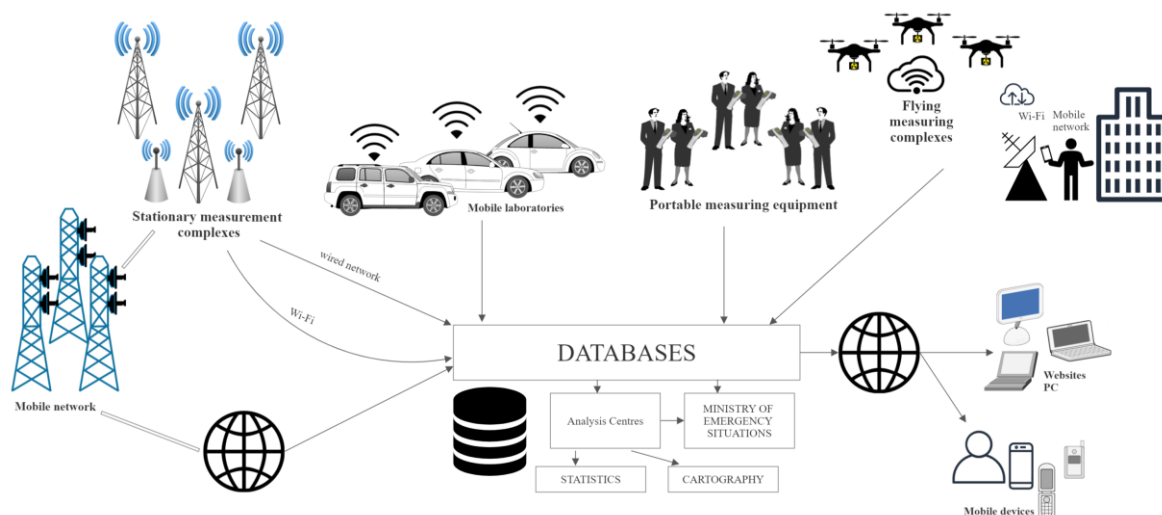


Figure 1 – Structural diagram of integrated system for monitoring radiation contamination using unmanned aerial vehicles and a system for storing, analysing and displaying data online in real time

Measuring information forms databases, which are further transferred to analytical centres and the Ministry of Emergency Situations.

The workability of the system is ensured by a large number of personalities, which are subdivided into levels and which interact with each other. The first level – "Meters" – whose task is to make measurements, control the measurement data and transmit them to the next level. Meters have access only to read and view their measurement data, which they receive and send at the time of measurement. The next level is "Developers", whose task is to optimise systems and develop new solutions. They have access to read and view data from all Meters in the system, and they prepare reports based on the data they receive, which, together with the data from the Meters, are passed on to the next level. "Technicians" – the level whose task is to adjust, repair and verify the equipment. On the basis of the files received from Developers and Meters they analyse the system and identify inaccuracies. Technical specialists have read-only access without modification and on the basis of the performed data analysis, transmit reports to the next level of the "Analytical Centre". The Analytical Centre performs statistical processing of data and provides data for cartography. The analytical centre, as well as the previous level, creates backup copies of the processed information, as well as sends the obtained statistical data and maps to the next level. "Site Administrator" – has access only to what has been granted access and further regulates the access of the "User" to the information on the site.

Radiation detectors allow to expand the range of application of unmanned aerial vehicles: in monitoring of radiation contamination zones, deposits, as well as objects (dumps, hazardous waste disposal sites, etc.), where exceeding of permissible concentrations of radioactive pollutants can be observed. The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) to measure the spatial

distribution of radioactive concentrations is of great interest. UAVs are currently used for a wide range of applications, from mapping to surveillance, from reconnaissance to verification. A feature of the most advanced quadcopters of the DJI series is the possibility of controlled flight and hovering at a point with specified GPS coordinates [1].

Mobile high-sensitivity gamma radiation detectors are produced in the Republic of Belarus on the basis of a scintillation detector based on a silicon photomultiplier tube (PMT).

The peculiarity of the domestic detector is the method of temperature stabilisation of the scintillation detector parameters, which allows to create fast, energy-efficient mobile measuring complexes on its basis [2]. Measuring information from unmanned measuring systems allows to record time, altitude, nature and trajectory of movement, GPS coordinates of the quadcopter, which is the basis for building 2D and 3D maps of radiation background. The use of mobile flying measuring complexes will expand the capabilities of radiation control systems in terms of operational monitoring of the area.

The proposed development and creation of cheap and effective flying measuring stations for radiation background control will find application for remote detection of radiation contamination, its localisation and analysis near industrial complexes, sources of anthropogenic and natural contamination, in places of human activity associated with health hazards.

References

1. Flying measuring station based on drone DJI Phantom / N.N. Kolchevsky [et al.] // Applied Problems of Optics, Informatics, Radiophysics and Condensed State Physics: materials of VII International scientific and practical conference, Minsk, 18–19 May 2023. – P. 417.
2. Comrad [Electronic resource]. – Mode of access: http://www.comrad.biz/index_ru.html. – Date of access: 20.09.2023.

UDC 351.814.334.3,521.3

AIR AND SATELLITE TRAFFIC CONTROL AND TRACKING

Balukho I.N.², Boika F.V.¹, Beglik V.V.², Kolchevsky N.N.²

¹University of the National Academy of Sciences²Belarusian State Medical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Control and tracking of air and satellite traffic is carried out by official international and state systems. The paper discusses satellite and air traffic control systems.

Key words: UAV, 1CUBEEL, BSUSAT, EU11S, satellite, aircraft.

КОНТРОЛЬ И СОПРОВОЖДЕНИЕ ВОЗДУШНОГО И СПУТНИКОВОГО ДВИЖЕНИЯ

Балухо И.Н.², Бойко Ф.В.¹, Беглик В.В.², Кольчевский Н.Н.²

¹Университет Национальной академии наук БеларусиБелорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Контроль и сопровождение воздушного и спутникового движения осуществляется системами официальными международными и государственными системами. В работе обсуждаются системы контроля спутников и воздушного движения.

Ключевые слова: БПЛА, 1CUBEEL, BSUSAT, EU11S, спутник, самолет.

Address for correspondence: Kolchevsky N.N., Kurchatova str. 7–403, Minsk, 220045, Republic of Belarus
e-mail: kolchevsky@bsu.by, info@ipnk.basnet.by

Introduction

The world is witnessing an increase in air and satellite traffic. BSUSat-2, the second BSU nanosatellite, was successfully launched into orbit on 27 June 2023 at 14.34.49. Its capabilities can be used in civil aviation to improve flight safety. Air traffic flight data passes through several ATC (air traffic control) centres, each of which is responsible for its own area of responsibility and, as a rule, does not have detailed information on the further movement of aircraft (aircraft). Therefore, the need for global online aircraft tracking systems has increased dramatically. In September 2023, the Presidential Decree "On State Registration and Operation of Civil Unmanned Aircraft Systems" was adopted. The document is aimed at ensuring the safe use of the airspace of Belarus by civil unmanned aerial vehicles and aeromodels.

1. Satellite traffic

As of 2023, there are more than 2400 active satellites orbiting the Earth [1]. Satellite motion control and monitoring can be performed online (<https://db.satnogs.org/satellite/>, <https://www.space-track.org/>, <https://bsusat.com/>, etc.) or with the help of specialised software, e. g. Orbitron (Figure 1) www.stoff.pl/, SatPC32 www.ams-at.org/product/satpc32-by-electronic-download/, Ha-IloSat <https://hallosat.software.informer.com/> and others.

BSUSat-2, the second BSU nanosatellite, was successfully launched into orbit on 27 June at 14.34.49. BSUSat-2 was launched in Russia from the launch complex of Vostochny Cosmodrome on a Soyuz-2.1b launch vehicle with Meteor-M spacecraft № 2–3. The first BSU satellite was launched into orbit on 29 October 2018 in China from the Jiuquan Cosmodrome. The comparative characteristics of the satellites are shown in Table 1.

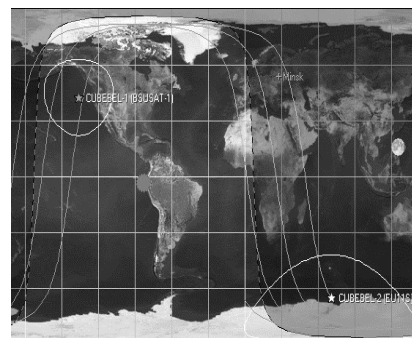


Figure 1 – Image of the position and trajectory of the BSU satellites

Table 1. Orbital parameters and characteristics of the BSU satellites

Satellite name	1CUBEEL-1 (BSUSAT-1)	1CUBEEL-2 (EU11S)
ID satellite	WMQB-0532-9164-6364-5821	PIHV-8715-3112-5892-6258
NORAD ID	43666	57175
Number COSPAR	2018-083-E	2023-091-K
Launch date	2018-10-29	2023-06-27
Inclination	97.371	97.656
RAAN	303.192	320.197
Eccentricity	0.0010013	0.0015132
Perigee Argument	110.259	314.294
Major axle	6 806 km	6 934 km
Perigee x Apogee	421 x 434 km	545 x 566 km
BStar (κ-τ топм.)	0.001247800 1/ER	0.000576660 1/ER
Average anomaly	249.974	45.705
Height (km)	458.624	563.490
Speed (km/sec)	7.633	7.582
Period	1h 33m 07s (93.12 min.)	1h 35m 45s (95.75 min.)
Turns per day	15.46289459	15.03707456
№ coil	27 361	1 443

The satellite passes the orbit in 95 minutes. It passes over Belarus six times a day: three times in the morning and three times in the evening.

2. Air traffic control and tracking

There are more than 200 thousand aircraft flights per day in the world [2]. Satellite traffic control and monitoring can be performed online (www.flightradar24.com/

data/statistics, www.ru.flightaware.com/live/, etc.) or using specialized programmes, e.g. The Flight Tracker (iOS, Android), Flightradar24 (iOS, Android) <https://apps.apple.com>, <https://play.google.com/>.

The 1CUBEBEL-2 (EU11S) satellite has a module that could be used by civil aviation to monitor aircraft movements. It is difficult for regional air traffic control centres to control aircraft flights over the oceans and over many areas of land. An example of such a flight, taken from www.flightradar24.com, is shown in the Figure 2.

Part of the BAW9VA flight route is marked with a dotted line and is estimated. The satellite, flying over the ocean, can detect radio beacons from aircraft.

Conclusion

Existing satellite and aircraft tracking and tracking systems can be used in joint measurement systems to, for example, improve real-time position control of satellites, aircraft, and other aircraft.



Figure 2 – Image of the position and trajectory of flight BAW9VA

References

1. SatNOGS DB [Electronic resource]. – Mode of access: <https://db.satnogs.org/satellite/>. – Date of access: 20.09.2023.
2. Flightradar24 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.flightradar24.com>. – Date of access: 20.09.2023.

УДК 621.396.96

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Адамович К.А., Веселовский В.А., Любинский К.А., Гулич А.Ю., Голубович А.И., Исаев А.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Комплекс для мониторинга состояния обмоток электромашин создан для точной и надежной проверки двигателей. Он быстро выявляет возможные проблемы и дефекты, применяя метод сравнения обмоток. Комплекс предоставляет точную оценку состояния каждой обмотки и отображает результаты на панели, помогая оператору принимать решения. Комплекс включает в себя панель с частотным преобразователем, индикатор, кнопки для переключения режимов, сенсорный экран и микропроцессор. Он оснащен кнопкой «STOP» для быстрой остановки в случае аварии и светодиодами для отображения состояния комплекса. Модули управления реле играют важную роль в переключении режимов работы комплекса. Этот комплекс является ключевым инструментом для поддержания эффективной работы электродвигателей в различных отраслях промышленности.

Ключевые слова: диагностический комплекс, контроль состояния, обмотки электрических машин, диагностика.

DIAGNOSTIC COMPLEX FOR MONITORING THE CONDITION OF ELECTRIC MACHINE WINDINGS

Adamovich K.A., Veselovsky V.A., Lyubinsky K.A., Gulich A.Yu., Golubovich A.I., Isaev A.V.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The complex for monitoring the condition of electric machine windings is designed for accurate and reliable inspection of motors. It quickly identifies potential problems and defects by using a method of comparing windings. The complex provides an accurate assessment of the condition of each winding and displays the results on the panel, assisting the operator in decision-making. The complex includes a panel with a frequency converter, an indicator, buttons for mode switching, a touch screen, and a microprocessor. It is equipped with a "STOP" button for quick shutdown in case of an emergency and LEDs to display the state of the complex. Relay control modules play a crucial role in switching the complex is operating modes. This complex is a key tool for maintaining the efficient operation of electric motors in various industrial sectors.

Key words: diagnostic complex, state control, electric machine windings, diagnostic.

*Адрес для переписки: Исаев А.В., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: isaev0302@gmail.com*

Диагностический комплекс контроля состояния обмоток электрических машин разработан с учетом потребностей в надежной и точной диа-

гностике двигателей и обмоток. Его основной задачей является обеспечение оперативного обнаружения потенциальных неисправностей и

дефектов, которые могут возникнуть в обмотках электродвигателей.

Принцип работы этого комплекса основан на методе сравнения обмоток между собой. Это позволяет выявлять межвитковое дефектное сопротивление и давать точную оценку состояния каждой обмотки. Результаты диагностики отображаются на лицевой панели комплекса, предоставляя оператору необходимую информацию для принятия решений. Кроме этого, комплекс обладает широким функционалом, включая возможность выбора уровня напряжения и определения мощности двигателя. Он также способен проверять каждый двигатель в отдельности на работоспособность и анализировать состояние сервоприводов, что является важным аспектом в области промышленной автоматизации.

Комплекс контроля состояния обмоток электрических машин представлен на рисунке 1 и состоит из лицевой панели, на которой расположен частотный преобразователь, предназначенный для регулирования скорости асинхронного электродвигателя. Блок индикации сигнализирует о переключении реле. Далее присутствуют кнопки, которые служат для переключения режима работы схемы. После сигнала передается на сенсорный экран. К сенсорному экрану подключено микропроцессорное устройство, которое собирает информацию о работающей системе. В свою очередь микропроцессорное устройство соединено с блоком переключателей (коммутаторов).



Рисунок 1 – Общий вид диагностического комплекса для определения состояния электрических машин

Кнопка «STOP» ($S1$) предназначена для мгновенной полной остановки диагностического комплекса. Это важное устройство безопасности, которое дает возможность немедленно прекратить работу в случае нештатных ситуаций или необходимости остановки.

Светодиоды ($L1$, $L2$) используются для светодиодной индикации текущего режима работы комплекса контроля. Они предоставляют визуальную обратную связь, позволяя быстро оценить текущий режим работы и возможные неисправности.

Модули управления реле ($K1$, $K2$) и сами реле ($K1.1$, $K1.2$, $K1.3$, $K2.1$, $K2.2$, $K2.3$) играют ключевую роль в переключении режимов работы комплекса. Они обеспечивают автоматическое управление процессом диагностики и переключение между различными режимами, что позволяет максимально эффективно использовать устройство в различных ситуациях.

Основой комплекса является устройство измерения дефектного межвиткового сопротивления в обмотках ЭМ, структура которого представлена на рисунке 2.

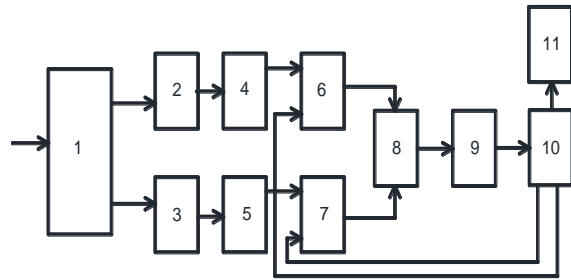


Рисунок 2 – Структура системы для измерения дефектного сопротивления обмоток электрических машин

Система измерения дефектного межвиткового сопротивления содержит регистрирующий прибор 1, фильтр низких 2 и высоких 3 частот, блоки компараторов 4 и 5, два блока формирователя импульсов 6 и 7, схему аналогового умножения (смеситель) 8, избирательное устройство 9, систему индикации и отображения результатов 11 и управляющее устройство 10.

Работа системы в виде диаграммы работы представлена на рисунке 2 и выглядит следующим образом. Регистрирующий прибор 1 принимает сигнал, представляющий собой характерную кривую тока обмотки электрической машины и передает его на двухканальный блок фильтров 2 и 3, где по одному каналу выделяется спектр первой гармоники, а по второму – суммарный спектр высших гармоник. Далее, с помощью блоков компараторов 4 и 5 выделяются характерные точки кривых спектра и эта информация передается на блоки формирователя импульсов 6 и 7, которые под управлением управляющего устройства 10, задающего основные временные параметры импульсов, формируют две независимые импульсные последовательности. Затем эти импульсные последовательности посредством смесителя 8 сводятся в одну, которая представляет собой сложную комбинацию импульсов с заданными временными параметрами: T_0 – период импульсной последовательности; t_n – длительность импульсов; и t_s – время задержки между импульсами в пачке. На избирательном

устройстве 9 выделяется необходимая, максимально информативная гармоника, по анализу которой можно судить о состоянии обмоток электрических машин. Вся текущая информация о проводимых измерениях, а также о состоянии образцов выводится на систему индикации 11.

Комплекс контроля состояния обмоток электрических машин является важным инструментом для поддержания непрерывной и эффективной работы электродвигателей в различных промышленных отраслях.

УДК 681.2.04

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ

Атаева О.Ч., Атаева Б.Х.

*Туркменский государственный архитектурно-строительный институт
Ашгабад, Туркменистан*

Аннотация. Поскольку высокие токсичные ртути активно загрязняют нашу окружающую среду и плохо влияют на состояние экосистемы, а также на здоровье человека, очень важно быстро и точно определить уровень накопления ртути. Допустимые требования к данному химическому элементу и их соединения указаны в документах и контролируют его содержание различные лаборатории. В работе приводятся результаты исследования и разработки нового ртутного анализатора – прибора, который позволяет определить концентрацию ртути в атмосфере и любых газах, продуктов питания, воды, лекарственных препаратах, косметических и прочих изделиях.

Ключевые слова: средство измерений, метрология, анализатор, экосистема.

INNOVATIVE MEASUREMENT DEVICES

Ataeva O.Ch., Ataeva B.Kh.

*Turkmen State Institute of Architecture and Construction
Ashgabat, Turkmenistan*

Abstract. Since high toxic mercury actively pollutes our environment and has a bad effect on the state of the ecosystem, as well as on human health, it is very important to quickly and accurately determine the level of mercury accumulation. The permissible requirements for this chemical element and their compounds are specified in the documents and its content is controlled by various laboratories. The paper presents the results of research and development of a new mercury analyzer – a device that allows you to determine the concentration of this liquid Hg in the atmosphere and any gases, food, water, medicines, cosmetics and other products.

Key words: measuring instrument, metrology, analyzer, and ecosystem.

*Адрес для переписки: Атаева Б.Х., ул. Баба Аннанова, 136, Ашгабад, Туркменистан
e-mail: bagul.atayewa@yandex.ru*

Средство измерения является техническим средством, используемым при измерении и обладающим нормированным метрологическим свойством.

Средства измерений различаются:

– по метрологическому назначению: рабочие и метрологические;

– по конструктивному исполнению: меры, измерительные приборы, измерительные установки, измерительные системы и измерительные комплексы;

– по уровню автоматизации: не автоматические, автоматизированные и автоматические;

– по уровню стандартизации: стандартные и не стандартные;

– по отношению к измеряемой величине: основные и вспомогательные [1].

Метрологическое средство измерений, предназначенное для измерений метрологических целей:

Литература

1. Анализ состояния электрических машин путем измерения межвиткового сопротивления в его обмотках / А. В. Исаев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14, № 2. – С. 126–134.

2. Оценка состояния обмоток электрических машин по величине межвиткового сопротивления / А. В. Исаев [и др.] // Материалы Республиканской научно-практической конференции, 25–26 мая 2023 г. / сост. И.Н. Прокопеня. – Минск : БНТУ, 2023. – С. 54–59.

Особенности систем автоматизации с метрологической точки зрения по сравнению с отдельными измерительными устройствами следующие:

- пространственное распределение технических средств, поэтому изделия системы находятся в различных условиях эксплуатации;
- наличие каналов связи, подверженных воздействию помех;
- многофункциональность и многоканальность, следовательно, наличие измерительных коммутаторов, промежуточных преобразователей, взаимное влияние каналов;
- наличие возможности изменения или развития структуры системы в процессе эксплуатации, гибкость;
- связь с органами управления, регулирования и вычислительной техникой;
- работа преимущественно в динамическом режиме;

– длительное непрерывное функционирование;

– невозможность полного отключения системы и ее отдельных устройств для профилактических работ без остановки технологического процесса.

В работе представлены назначение анализаторов ртути и их виды.

Состав ртутного комплекса и сферы его применения. Поскольку высокая токсичность ртути (Hg) активно загрязняет окружающую среду и негативно влияет на состояние экосистемы, здоровье человека, важно быстро определить уровень накопления ее. Допустимые требования к данному химическому элементу и их соединения указаны в документах, контролируют его содержание разными лабораториями [3].

Для точного и достоверного определения используется анализатор ртутного содержания, об этом и будет говорить дальше (рисунок 1).

Такое оборудование должно обязательно быть установлено у всех специальных служб и различных лабораторий и поэтому разные:

- импортные и отечественные;
- переносные (портативные) и стационарные;
- газоанализаторы ртути, определяющие наличие ее в воздухе и газах, и универсальные, работающие с жидкими и твердыми пробами;
- экспресс-анализаторы, работающие без дополнительной проб подготовки, и устройства, нуждающиеся в ней;
- дорогие и дешевые.

Этот анализатор ртутного типа (рисунок 1) может изменять концентрацию паров токсического металла в воздухе окружающего нас и различных газах естественного и технологического происхождения в реальном времени. Он может быть использован как в стационарных точках, так и при движении пешком и на любом транспорте. «РА-915М» – усовершенствованная модель, особенностью которой является следующее:

- время автономной работы до 12 часов;

- повышается влаго- и пылезащищенность;
- появился выносной дисплей;
- обновлена коммуникативная система;
- повышена надежность;
- улучшена эргономика.



Рисунок 1 – Анализатор ртути «РА-915М»

Принцип работы прибора заключается в прохождении анализируемого воздуха через кювету, осуществляющую анализ, и на дисплее выводится показатель концентрации определенного вещества. Для определения данного вещества в пробах жидкости и твердости также можно использовать данный анализатор концентраций ртутных паров, но лишь вместе с специальной приставкой [4].

Универсальная ртутная приставка «УРП» стала новым шагом в развитии линейки приставок для анализаторов. В отличие от предшественниц, при обнаружении ртути она может работать в двух режимах измерений:

Методом «холодного пара», при котором ее характеристики совпадают с более ранними моделями. Этот метод включает в себя использование реактора, где ртуть (Hg) под действием хлора олова восстанавливается до состояния атома [5].

Метод пиролиза – это метод термической деструкции твердых проб и деструкции ртути (Hg), а затем анализатор определяет количество выделенного токсичного вещества.

Литература

1. Здоровцев, С.В. Информационно-измерительная система на базе цифровых функциональных электронных модулей / С.В. Здоровцев, Д.П. Кушнеров, В.А. Сушко // Материалы 11-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2018» г. Минск, 14–16 ноября 2018 г. – Минск : БНТУ 2018. – С. 17–19.
2. Информационно-измерительная техника и технологии: учеб. для вузов / В.И. Калашников [и др.]; под ред. Г.Г. Раннева. – М. : Высшая школа, 2002. – 454 с.
3. Клаассен, К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике / К.Б. Клаассен. – М. : Постмаркет, 2000. – 352 с.
4. Измерительные преобразователи контроля перемещения и положения в числовом программном управлении станками (обзорная информация) / ЦНИИТЭИ приборостроения. – М., 1974. – ТС-03, вып. 2.
5. Каким прибором измеряется ртуть [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://akter-sochi.ru/articles/kakim-priborom-izmeryaetsya-rtut>.

УДК 519.876.5

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ПРЕДИКТИВНЫЕ ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В ВИРТУАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Борисенок С.В., Тявловский А.К.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Проведено сравнение информационных и предиктивных цифровых двойников применительно к средствам измерений. В то время как в машиностроении наибольшее распространение получили информационные цифровые двойники, в приборостроении наиболее целесообразно и технически возможно создание предиктивных цифровых двойников средств измерений. Их внедрение послужит развитию новой перспективной области, которую можно охарактеризовать как «виртуальные измерения».

Ключевые слова: цифровые двойники, прогнозирование, математические модели, виртуальные измерения.

INFORMATION AND PREDICTIVE DIGITAL TWINS IN VIRTUAL MEASUREMENTS

Borisenok S.V., Tyavlovsky A.K.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Informational and predictive digital twins are compared in relation to measuring instruments. While information digital twins are most widespread in mechanical engineering, in instrument engineering it is most expedient and technically possible to create predictive digital twins of measuring instruments. Their implementation will contribute to the development of a new promising area, which can be described as "virtual measurements".

Key words: digital twins, predicting, mathematical models, virtual measurements.

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

Цифровой двойник (англ. *Digital Twin*) – цифровая копия физического объекта или процесса, помогающая оптимизировать эффективность управления этими объектами и процессами. Концепция «цифрового двойника» является частью четвертой промышленной революции и призвана помочь предприятиям быстрее обнаруживать физические проблемы, точнее предсказывать их результаты и производить более качественные продукты [1].

К настоящему времени сформировалось несколько классификаций цифровых двойников. В рамках цифровизации приборостроительной отрасли наибольший интерес представляет классификация по назначению, в соответствии с которой можно выделить следующие виды цифровых двойников [2]:

1. **Информационные** цифровые двойники синхронизируются со своим прототипом и передают оператору данные об объекте в реальном времени. Это нужно для своевременной диагностики, например, конвейера или автомобиля. Кроме 3D-моделей, в информационных цифровых двойниках используют *IoT*-датчики, которые устанавливаются непосредственно на сам объект.

Создание и использование информационных цифровых двойников требует оснащения объекта реального мира большим количеством датчиков, непрерывно регистрирующих и передающих зна-

чения параметров, включенных в цифровую модель объекта. Такой подход приемлем, когда в модели используется сравнительно небольшое количество параметров либо когда изначально высокая сложность объекта делает дополнительное усложнение его за счет установки датчиков сравнительно небольшим. Кроме того, сами габариты объекта должны позволять размещение необходимых датчиков без значительного увеличения веса и габаритов конструкции. В частности, такие цифровые двойники есть у каждого автомобиля *Tesla*. Датчики встроены в автомобиль и передают данные на завод, где искусственный интеллект решает, требуется машине техническое обслуживание или нет. Таким образом, часть ошибок компания может устранить удаленно.

2. **Предиктивные** цифровые двойники позволяют прогнозировать работу объекта во время эксплуатации и в разных ситуациях. С помощью предиктивных двойников можно спрогнозировать, при каких обстоятельствах объект выйдет из строя. В этом случае наличие *IoT*-датчиков позволяет повысить достоверность прогнозирования за счет наличия обратных связей от реального объекта, однако не является безусловно обязательным. При наличии полной математической модели объекта, учитывающей как его собственные параметры, так и влияние внешних факторов, прогнозирование поведения реального объекта с

использованием предиктивного цифрового двойника может осуществляться путем ввода в эту модель данных от независимых (не связанных с объектом) датчиков параметров окружающей среды либо прогнозных (модельных) значений этих параметров, тогда как в качестве собственных параметров объекта подставляются параметры цифрового двойника.

3. **Операционные** цифровые двойники помогают смоделировать бизнес-процессы компании и решать управленческие задачи.

Независимо от вида деятельности можно выделить несколько ключевых задач, которые помогают решать виртуальные двойники. К этим задачам относятся:

1. Повышение эффективности бизнеса (производства).
2. Обеспечение безопасности.
3. Экономия ресурсов.

Повышению эффективности способствует в первую очередь применение предиктивных цифровых двойников, позволяющих отслеживать состояние оборудования в реальном времени и заблаговременно предугадывать сбой или поломку. Это позволяет осуществлять эксплуатацию оборудования «по состоянию», не прибегая к планово-предупредительным ремонтам, сопровождающимся простоями оборудования, и при этом осуществлять ремонты как предупредительные, а не по факту выхода оборудования из строя, тем самым избегая дополнительных потерь при внезапных поломках.

Безопасность обеспечивается в первую очередь информационными цифровыми двойниками, позволяющими удаленно контролировать параметры потенциально опасного объекта или производства, в том числе непосредственно в ходе развития аварийной ситуации без риска для персонала.

Экономия ресурсов обуславливается в первую очередь возможностью предварительного тестирования изменений, вносимых в конструкцию или технологический процесс, без вмешательства в функционирование реального объекта. Это позволяет отбросить неэффективные решения, в том числе те, где неэффективность связана с долговременными последствиями изменений, до внесения реальных изменений в процесс или конструкцию, а также внедрять уже отлаженные на цифровом двойнике изменения без переходного периода.

Создание цифрового двойника измерительного прибора требует учета параметров большого количества элементов, составляющих измерительный тракт, причем в большинстве случаев для каждого из компонентов требуется учет более, чем одного параметра. В то же время математические модели, описывающие поведение каждого компонента и их взаимное влияние основаны на

известных физических законах и хорошо отработаны. С учетом этого, на современном уровне развития технологий создание полноценных информационных цифровых двойников измерительных приборов не представляется возможным из-за необходимости учета чрезмерно большого количества параметров в компактной конструкции. Напротив, создание предиктивных цифровых двойников на основе математической модели прибора и без обратных связей с реальным объектом или с минимальным количеством таких связей не только возможно, но и высоко актуально, поскольку такие двойники позволяют повысить эффективность использования приборов. Не в последнюю очередь это связано с тем, что большинство отказов средств измерений являются т. н. метрологическими отказами, при которых каждый из узлов прибора в отдельности сохраняет свою работоспособность, однако метрологические характеристики средства измерений в целом выходят за пределы допускаемых значений [3]. На реальном приборе такие отказы выявляются только в ходе его поверки, при этом невозможно определить, как долго в течение межповерочного интервала прибор эксплуатировался с метрологическим отказом. Использование предиктивного цифрового двойника позволит не только предсказать метрологический отказ до момента (либо в момент) его наступления, но и определить его причины и способы устранения. В последнем случае перспективным является также использование упомянутого выше подхода, применяемого в настоящее время только к информационным цифровым двойникам и предусматривающего использование искусственного интеллекта для распознавания отказа и необходимости мер по его устранению. Задача определения метрологического отказа и степени его критичности относится к классу многофакторных неформализуемых задач, для которых эффективны нейросетевые методы решения [4].

Таким образом, создание цифровых двойников средств измерений составляет актуальную задачу метрологии, которую можно отнести к отдельной новой области «виртуальных измерений», и решение которой может быть получено в форме предиктивных цифровых двойников, в максимальной степени использующих виртуальные модели приборов и их компонентов и нейросетевые методы анализа метрологических отказов.

Литература

1. Цифровой двойник [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9%20%D0%B4%D0%B2%D0%BE%D0%B9%D0%BD%D0%B8%D0%BA#0>.
2. Гумаров, С. Что такое цифровые двойники и где их используют [Электронный ресурс] / С. Гумаров,

А. Крылов. – Режим доступа: <https://secrets.tinkoff.ru/razvitie/digital-twin/>.

3. Метрология. Основные термины и определения: РМГ 29-2013 ГСИ. – 2013.

4. Samarasinghe, S. Neural Networks for Applied Sciences and Engineering / S. Samarasinghe. – Boca Raton, FL: Auerbach Publications, 2006. – 570 p.

УДК 519.876.5

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Борисенок С.В., Тявловский А.К.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрена сущность цифровых двойников технических изделий и устройств, предъявляемые к ним требования и современное применение цифровых двойников в промышленности. К настоящему времени сформирована необходимая база для создания цифровых двойников средств измерений, однако дальнейшая цифровизация приборостроения сдерживается необходимостью решения многофакторной задачи моделирования взаимодействия электрических, механических и тепловых процессов в приборах, что является темой дальнейших исследований.

Ключевые слова: цифровые двойники, приборостроение, цифровизация, виртуальные модели.

PROSPECTIVE APPLICATIONS OF DIGITAL TWINS IN INSTRUMENTATION ENGINEERING

Borisenok S.V., Tyavlovsky A.K.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The essence of digital twins of technical items and devices, the requirements for them and the modern use of digital twins in industry are considered. To date, the necessary basis for creating digital twins of measuring instruments has been formed. However, further digitalization of instrumentation engineering is hampered by the need to solve the multifactor problem of modeling the interaction of electrical, mechanical and thermal processes in measuring devices, which is a topic for further research.

Key words: digital twins, instrumentation engineering, digitalization, virtual models.

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

Цифровой двойник позволяет смоделировать внутренние процессы, технические характеристики и поведение физического объекта на этапе проектирования. За счет этого источники ошибок или сбоев можно выявить и устранить еще до начала реальной эксплуатации. Это также позволяет экономить время и даже самые сложные производственные маршруты рассчитывать быстро, тестировать и программировать с минимумом затрат и усилий. Более того, на протяжении всего жизненного цикла модель непрерывно генерирует данные о состоянии своего физического аналога, то есть ведет постоянный мониторинг состояния оборудования и производственных систем. Цифровой двойник должен видеть, то есть распознавать, внутренние и внешние изменения, происходящие в изделии. Он должен уметь анализировать совокупность всех факторов и предлагать готовые сценарии развития ситуации, а также управлять процессом, в том числе без вмешательства.

Области использования цифровых двойников обширны. На основании архивных документов

создаются 3D-модели утраченных памятников архитектуры. Но наибольшее распространение на данном этапе технология получила в промышленности, поскольку именно цифровые двойники позволяют кардинально оптимизировать все процессы в производственно-сбытовой цепочке.

Значимость технологии цифровых двойников осознают в горнодобывающей промышленности. Один из свежих проектов – создание цифрового двойника поведения горных пород при бурении [1]. Это не только позволяет собирать и эффективно применять данные о работе оборудования, но и создает возможности для моделирования и прогнозирования работы объектов в различных условиях и режимах. Курс на цифровизацию держит и сектор машиностроения. Ученые моделируют процесс взаимодействия химических элементов. Например тех, из которых состоят сверхкрупные шины для БЕЛАЗа, чтобы они получились прочными и долговечными.

Технология виртуальных двойников также используется для моделирования различных составляющих и деталей.

Большинство примеров внедрения цифровых двойников как в отечественной, так и в мировой промышленности – это виртуальные модели отдельных элементов производства [1]. Речь идет о деталях, оборудовании, системах, линиях и процессах. Предполагается, что в дальнейшем предприятия будут отдавать предпочтение комплексному подходу. Он предполагает использование всех данных на всех этапах производственного цикла – от проектирования цифровой модели до анализа той информации, которую она генерирует в ходе жизненного цикла. Это повысит гибкость и эффективность работы компаний, позволит им быстрее адаптироваться к многообразию глобальных рынков и добиваться роста производительности для обеспечения долгосрочной конкурентоспособности.

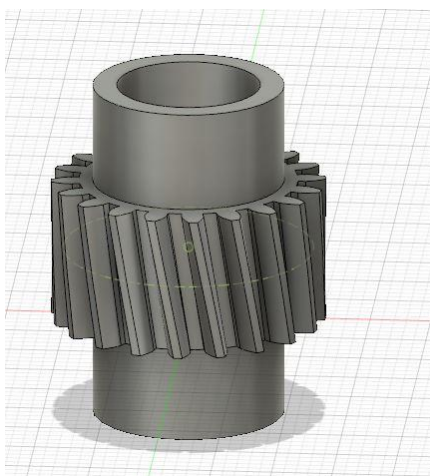


Рисунок 1 – 3D-модель (визуализация виртуального двойника) шестерни

В приборостроении использование цифровых двойников на сегодняшний день является новой и практически неисследованной технологией. Исходя из доступных литературных данных, соответствующие разработки как в Республике Беларусь, так и на мировом уровне в настоящее время отсутствуют. Это может объясняться сложностью и многофакторностью цифровых моделей средств измерений, которые должны учитывать ряд параметров, несущественных для цифровых двойников в машиностроении. Функционирование

средств измерений описывается передаточной функцией, основной и дополнительными погрешностями измерений, характеристиками чувствительности к факторам окружающей среды и параметрам питающей сети и т. д., причем все эти параметры находятся в сложных взаимных зависимостях как между собой, так и с параметрами компонентов, составляющих средство измерений. Вследствие этого наличия цифровых двойников отдельных компонентов измерительного прибора недостаточно для моделирования прибора в целом. К настоящему времени созданы достаточно эффективные системы компьютерного моделирования принципиальных электрических схем электронных устройств, в том числе позволяющие учитывать влияние параметров окружающей среды, взаимные электромагнитные наводки компонентов и др., системы моделирования конструктивных элементов и узлов, и их поведения при механических и тепловых нагрузках (моделирование методом конечных элементов). Таким образом, можно говорить о наличии необходимой базы для создания цифровых двойников средств измерений. Однако такие цифровые двойники не могут являться простым объединением разрозненных моделей электрических, механических и тепловых процессов в приборах, а должны учитывать многообразные взаимодействия этих процессов. Данная многофакторная задача требует глубоких фундаментальных исследований, а ее решение позволит создавать цифровые двойники средств измерений, обеспечивающие анализ поведения средств измерений в реальных условиях эксплуатации, определение их метрологических характеристик, диагностику и прогнозирование метрологических отказов без проведения дорогостоящей процедуры поверки, требующей сложного оборудования и высокоточных эталонов и образцовых материалов, что в конечном счете обеспечит повышение эффективности приборостроительной отрасли путем ее цифровизации.

Литература

1. Что такое цифровой двойник, и почему они так важны для производства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sb.by/articles/kopiya-nekhuzhe-originala-tsifrovye-dvoyniki.html>.

УДК 57.088.1

ИЗУЧЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ В ГЕНЕТИЧЕСКОМ АНАЛИЗАТОРЕ НАНОФОР 05

Бочарова Д.В., Меркурьев А.В., Белов Д.А., Лавров Г.С., Курочкин В.Е.

*Институт аналитического приборостроения РАН
Санкт-Петербург, Российская Федерация*

Аннотация. Проведена экспериментальная оценка аналитической чувствительности измерения сигналов флуоресценции при использовании генетического анализатора «Нанофор 05». Эта оценка была осуществлена для шести различных спектральных диапазонов, которые соответствуют флуоресценции наиболее часто используемых в генетических исследованиях красителей. Полученные данные будут весьма полезными для исследователей, занимающихся планированием экспериментов, в которых необходимо одновременно выявлять несколько мишеней с разной концентрацией в анализируемом образце. Эта информация может значительно облегчить и улучшить процесс генетического анализа исследуемых образцов.

Ключевые слова: генетический анализатор, Нанофор 05, секвенатор, чувствительность, молекулярная биология.

STUDYING THE ANALYTICAL SENSITIVITY OF FLUORESCENCE INTENSITY MEASUREMENT IN THE GENETIC ANALYZER NANOPHORE 05

Bocharova D.V., Merkuriev A.V., Belov D.A., Lavrov G.S., Kurochkin V.E.

*Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences
Saint-Petersburg, Russian Federation*

Abstract. An experimental assessment of the analytical sensitivity of fluorescence signal measurements was conducted for the genetic analyzer "Nanophore 05". This assessment was carried out for six spectral ranges corresponding to the fluorescence of the most commonly used dyes in genetic research. The obtained data can be valuable for researchers planning experiments in which it is necessary to simultaneously detect multiple targets with varying concentrations in the analyzed sample. This information can significantly facilitate and enhance the process of genetic analysis of the studied samples.

Key words: genetic analyzer, Nanophore 05, sequencer, sensitivity, molecular biology.

Адрес для переписки: Бочарова Д.В. ул. Ивана Черных, 31–33, лит. А., Санкт-Петербург, 198095, Российская Федерация, e-mail: souldarydary@gmail.com

Секвенирование ДНК является «золотым» стандартом в молекулярно-генетических исследованиях. Для анализа нуклеотидной последовательности широко используется секвенирование по методу Сенгера. Этот метод по-прежнему обеспечивает высочайшую точность прочтения среди всех существующих методов секвенирования [1]. Используемые в исследованиях генетические анализаторы позволяют не только обнаруживать мутации и определять длину повторов фрагментов ДНК, но также проводить их относительную количественную оценку.

Примером такого прибора является Генетический анализатор «Нанофор 05» [2]. Устройство осуществляет разделение флуоресцентно-меченных фрагментов ДНК методом капиллярного электрофореза с использованием лазерной индуцированной флуоресценции для детекции сигнала. Для учета и нормализации интенсивности свечения флуоресценции используется специальный раствор коротких фрагментов ДНК, меченных красителями. Этот раствор не только используется для калибровки прибора (спектральная калибровка), но и применяется во время фрагментного анализа в данном исследовании. Для одновременного выявления мишеней нуклеиновых кислот необходимо использовать большее

число одновременно детектируемых спектрально разделенных флуоресцентных красителей, каждый из которых измеряется в индивидуальном спектральном диапазоне.

Одними из важнейших аналитических характеристик метода являются аналитическая чувствительность измерения сигнала флуоресценции и динамический интервал измерений сигнала флуоресценции в каждом спектральном диапазоне. Аналитическая чувствительность метода капиллярного гель-электрофореза определяет минимальное количество (концентрацию) обнаруживаемого флуоресцентно меченного фрагмента ДНК в анализируемом образце. Динамический диапазон измерений представляет собой диапазон значений сигнала флуоресценции от минимально до максимально детектируемых значений сигналов флуоресценции [3].

Знание аналитической чувствительности генетического анализатора имеет высокую значимость при планировании экспериментов, где необходимо исследовать образцы с очень небольшим исходным количеством ДНК, которое даже после амплификации с помощью полимеразной цепной реакции целевых фрагментов позволяет получить интенсивности сигнала флуоресценции близкие к сигналу шумов базовой линии.

Знание динамического диапазона измерений представляет собой важную характеристику генетического анализатора. Это становится критически важным, когда исследуемые образцы представляют собой сложные смеси фрагментов ДНК с значительно различающимися относительными количествами фрагментов различных длин. В таких ситуациях наилучшие результаты исследования достигаются при использовании генетических анализаторов, обеспечивающих максимально широкий динамический диапазон измерений сигнала флуоресценции в каждом спектральном канале.

Для калибровки прибора в данном исследовании использовался спектральный калибратор Syn6Dye. Этот калибратор представляет собой раствор, содержащий шесть фрагментов ДНК, меченых флуоресцентными красителями: Sy660, Sy630, TAMRA, FAM, ROX и R110.

Для анализа применялись капилляры, собранные в линейки, состоящие из восьми капилляров в каждой. Внутренний диаметр капилляров составлял 50 мкм, внешний – 192 мкм, а их длина – 36 см до оптического окна для коротких капилляров и 50 см до оптического окна для длинных. Флуоресцентное излучение разделяется на разные спектральные компоненты с использованием дифракционной решетки и регистрируется при помощи КМОП камеры. Поскольку различные флуоресцентные красители излучают свет на различных длинах волн при возбуждении лазером, прибор способен обнаруживать все фрагменты ДНК, включая те, которые имеют одинаковую длину, но различаются спектрально [4].

Сигналы флуоресценции оцифровываются и сохраняются в файле, совместимом с программным обеспечением для дальнейшего анализа данных. На электрофореграмме, используемой для визуализации сигналов, помимо основных пиков, соответствующих интересующим фрагментам, всегда наблюдается фоновый дрейф базовой линии, а также шум и артефакты разделения и регистрации, известные как «выбросы». Алгоритм, предназначенный для обнаружения пиков в сигналах, осуществляет оценку уровня шума, присутствующего в электрофореграмме, и на основе этой оценки вычисляет порог, который определяет, какие пики следует считать значимыми. Важно подчеркнуть, что значение порога обнаружения имеет критическое значение, поскольку оно автоматически определяется программным обеспечением и непосредственно влияет на процесс фильтрации пиков в ходе последующего анализа.

Алгоритм поиска пиков применяет высокие стандарты при фильтрации сигналов, исключая из рассмотрения те пики, которые обладают амплитудой и шириной, сравнимыми с ложными пиками. Этот подход существенно повышает качество экспериментальных данных и снижает требования к объему исходного ДНК-образца для анализа.

На рисунках 1 и 2 представлены графики, иллюстрирующие отношение сигнал/шум в процессе разделения раствора Syn6Dye при различных степенях разведения: от 128 000, до 125 с шагом разбавления в 4 раза. Предполагалось, что разведение в 128 000 раз не будет иметь выраженного порога обнаружения. Однако результаты экспериментов оказались неожиданными: отношение сигнал/шум превысило значение 20 как на коротких, так и на длинных капиллярных линейках, что в соответствии с ранее установленными стандартами является приемлемым порогом обнаружения [4].

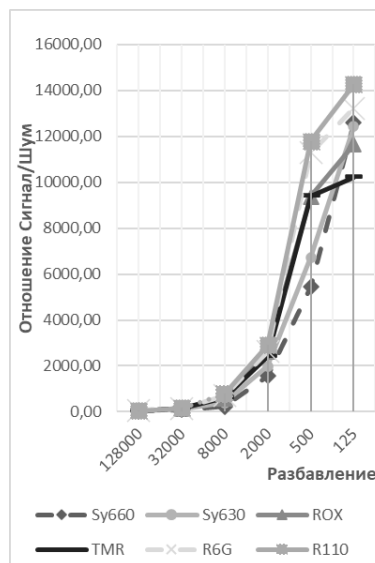


Рисунок 1 – Отношение сигнал/шум от разбавления на короткой линейке капилляров

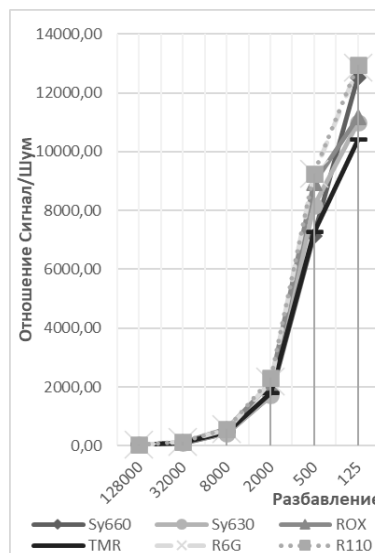


Рисунок 2 – Отношение сигнал/шум от разбавления на длинной линейке капилляров

Кроме того, ожидалось, что зависимость сигнал/шум будет проявлять линейное убывание с увеличением степени разведения, но результаты, полученные в ходе трехкратных повторений на

различных приборах Нанофор 05, указывают на нелинейный характер этой зависимости.

На основе вышеизложенного можно сделать вывод, что невозможно вывести теоретические зависимости между отношением сигнал/шум и степенью разведения. Поэтому необходимо провести последовательный ряд экспериментов с разными степенями разбавления раствора SynbDye и провести статистический анализ данных, чтобы определить аналитическую чувствительность и динамический диапазон для прибора Нанофор 05.

Анализ статистических данных может оказать значительное воздействие на улучшение эффективности алгоритма автоматического обнаружения пиков. Усовершенствованный алгоритм, в свою очередь, будет способствовать повышению конкурентоспособности данного прибора на рынке по сравнению с аналогичными устройствами.

УДК 621.38

МИГРАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЗАРЯДА ПОЛИЭТИЛЕНА ПОСЛЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Борбат М.С., Самарина А.В., Пантелеев К.В., Тьяловский А.К., Гусев О., Жарин А.Л.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе на примере полиэтилена высокого давления рассмотрены некоторые эффекты миграции (перераспределения) поверхностного электростатического потенциала в диэлектрическом материале под действием механических напряжений и при релаксации. В качестве метода и средств исследования изменения распределения поверхностного электростатического потенциала под действием механических напряжений использован сканирующий зарядочувствительный зонд в сканирующей модификации (аналог метода Scanning Kelvin Probe), разработанный и изготовленный в Белорусском национальном техническом университете. Последовательные сканирования поверхности зарядочувствительным зондом в процессе релаксации показывают изменения в распределении поверхностного электростатического потенциала, что дает представление о характере заряда и о кинетике, и направлении его миграции.

Ключевые слова: поверхность, диэлектрик, поверхностный электростатический заряд, миграция заряда, микропроцессорный зарядочувствительный зонд.

MIGRATION OF SURFACE ELECTROSTATIC CHARGE OF POLYETHYLENE AFTER DEFORMATION

Borbat M., Samarina A., Pantišalejeu K., Tyavlovsky A., Gusev O., Zharin A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The paper examines some effects of migration (redistribution) of surface electrostatic potential in a dielectric material, using high-density polyethylene as an example, during elastic mechanical deformation and during the relaxation process. As a method and means for studying changes in the distribution of surface electrostatic potential under the influence of mechanical stress, a scanning charge-sensitive microprocessor probe (analogue of the Scanning Kelvin Probe), developed at the Belarusian National Technical University, was used. Successive scans of the surface with a charge-sensitive probe during relaxation show changes in the distribution of the surface electrostatic potential, which gives an idea of the nature of the charge and the kinetics and direction of migration.

Key words: surface, dielectric, surface electrostatic charge, charge migration, microprocessor charge-sensitive probe.

*Адрес для переписки: Пантелеев К.В., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: k.pantišalejeu@bntu.by*

Избыточный заряд в твердых диэлектриках имеет тенденцию мигрировать как относительно материала объема и поверхности, так и в окружающую среду. В литературных источниках механизм миграции заряда практически исключительно рассматривается, как электрическая проводимость

Литература

1. Определение максимальной длины ДНК с точностью 99 % в полимере на основе линейного N,N-полидиметилакриламида методом капиллярного гель-электрофореза с лазер-индуцируемой флуоресценцией / Д.В. Бочарова [и др.] // Журнал аналитической химии. – 2021. – Т. 76, № 10. – С. 1–7.
2. Генетический анализатор Нанофор 05 в качестве средства измерений при секвенировании ДНК / А.А. Волков [и др.] // Измерительная техника. – 2021. – № 1. – С. 60–65.
3. Требования к качеству клинических лабораторных исследований : ГОСТ Р 53022.2-2008. – Введен РФ 01.01.2010. – М. : Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2010. – 31 с.
4. Метод поиска пиков размерного стандарта при фрагментном анализе ДНК / И.В. Заруцкий [и др.] // Журнал технической физики. – 2018. – Т. 88, № 9. – С. 1407–1412.

через окружающие тела [1]. Однако, с использованием метода сканирующего зонда Кельвина (Scanning Kelvin Probe), проведенные исследования распределения поверхностного электростатического потенциала диэлектриков на примере полиэтилена, подвергнутых различного вида внешнему

воздействию (осаждения заряда в поле коронного разряда [2], трибоэлектризация [3], облучение оптическим излучением [4] и др.), позволили расширить представления о механизмах миграции и (или) перераспределения поверхностного заряда.

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований эффекта миграции поверхностного электростатического потенциала на образце полиэтилена высокого давления (ПЭВД), подвергнутого механическому воздействию путем деформирования в области упругих деформаций, а также в процессе релаксации. В качестве метода и средств исследования изменения распределения поверхностного электростатического потенциала при деформировании и релаксации использован сканирующий зарядочувствительный микропроцессорный зонд (аналог метода сканирующего зонда Кельвина), разработанный и изготовленный в Белорусском национальном техническом университете [5–7]. Полученные с помощью зарядочувствительного зонда измерительные данные представляют собой карты распределения поверхностного электростатического потенциала, а последовательные сканирования поверхности образца после приложения нагрузки и в процессе релаксации показывают изменения в распределении поверхностного электростатического потенциала, что дает представление о характере заряда и о кинетике, и направлении его миграции.

В результате исследований установлено, что локальные механические напряжения, возникающие при деформировании образца, приводят к миграции поверхностного потенциала вдоль поверхности и его перераспределению в область деформирования (рисунок 1, *а*). Такой механизм можно объяснить, учитывая наличие глубоких ловушек заряда на поверхности и их увеличение в области деформирования и мелких ловушек в объеме, что затрудняет перемещение заряженных частиц в объеме.

В процессе релаксации (рисунок 1, *б*) поверхностный электростатический потенциал следует экспоненциальному спаду в области деформирования и перераспределению потенциала по поверхности образца. Следует отметить, что характер распределения потенциала в конце релаксации (рисунок 1, *в*) схож с характером распределения до деформирования образца. Из этого следует, что в случае упругого характера деформирования заряженные частицы мигрируют преимущественно вдоль поверхности.

В процессе экспериментальных исследований также установлено, что скорость диссипации поверхностного заряда при релаксации значительно ниже при более низких значениях относительной влажности (60 %), чем при более высоких значениях (90 %). Зависимость скорости диссипации поверхностного потенциала от влажности окружающей среды хорошо согласуется с результатами, полученными в работе [2] при исследовании

процессов миграции поверхностного заряда в зависимости от относительной влажности окружающей среды на образцах полиэтилена при зарядке их поверхности в поле коронного разряда.

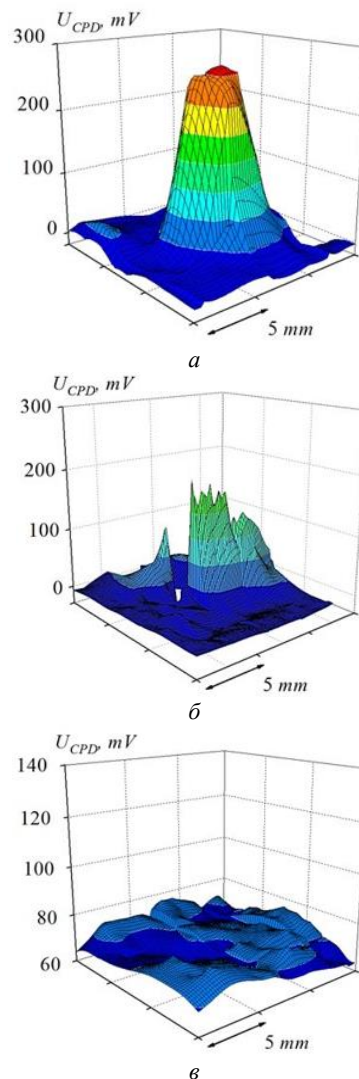


Рисунок 1 – Карты распределения поверхностного электростатического потенциала образца полиэтилена высокого давления после упругого деформирования (*а*) и в процессе релаксации (*б*, *в*) [5]

Литература

1. Patterns of Electrostatic Charge and Discharge in Contact Electrification / S.W. Thomas [et al.] // *Angewandte Chemie*. – 2008. – Vol. 120, iss. 35. – P. 6756–6758.
2. Burgo, T.A.L. Electric potential decay on polyethylene: role of atmospheric water on electric charge build-up and dissipation / T.A.L. Burgo, C.A. Rezende // *J. Electrostat.*, 2011. – Vol. 69. – P. 401–409.
3. Burgo, T.A.L. Triboelectricity: macroscopic charge patterns formed by self-arranging ions on polymer surfaces / T.A.L. Burgo, T.R.D. Ducati // *Langmuir*, 2012. – Vol. 28. – P. 7407–7416.
4. Анализ распределения электрофизических и фотоэлектрических свойств нанокompозитных полиме-

ров модернизированным зондом Кельвина / К.В. Пантелеев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 4. – С. 386–397.

5. Digital contact potential probe in studying the deformation of dielectric materials. Informatics / K. Pansialeyeu [et al.] // Control, Measurement in Economy and Environmental Protection. – 2020. – № 10, vol. 4. – P. 57–60.

6. Интеллектуальный сенсор для измерительных систем, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик / В.А. Микитевич [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14, № 1. – С. 18–26.

7. Универсальный цифровой зондовый электродметр для контроля полупроводниковых пластин / А.Л. Жарин [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14, № 3. – С. 161–172.

УДК 620.179.14/15

МЕТОДИКА И УСТРОЙСТВО ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБРАЗЦОВ НА УСТАЛОСТЬ С ЗАДАННЫМ АЛГОРИТМОМ НАГРУЖЕНИЯ

Бусько В.Н.

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

Аннотация. Разработана эффективная методика и создано устройство для проведения циклических механических усталостных испытаний при изгибе стальных образцов одно- или двухчастотным нагружением. Показаны схема устройства и описан принцип работы. Эффективность механических испытаний достигается за счет применения дополнительных силовых элементов в виде подшипников качения с разным их количеством и разными диаметрами. Использование предлагаемой методики и устройства позволяет осуществлять нагружение испытываемых образцов по заданному алгоритму с повышенной производительностью испытаний.

Ключевые слова: механические испытания, машины, стенды и устройства для циклических испытаний на усталость, стальные образцы.

METHODOLOGY AND DEVICE FOR MECHANICAL FATIGUE TESTING OF FERROMAGNETIC SPECIMENS WITH A GIVEN LOADING ALGORITHM

Busko V.N.

*Institute of Applied Physics of Belarus National Academy of Sciences
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. An effective methodology is developed and a device for cyclic mechanical fatigue bending tests of steel specimens by single- or dual-frequency loading is created. The scheme of the device is shown and the principle of operation is described. The efficiency of mechanical testing is achieved by using additional force elements in the form of rolling bearings with different numbers and diameters. The use of the proposed methodology and device allows to carry out loading of test specimens according to a given algorithm with increased productivity of tests.

Key words: mechanical testing, machines, benches and devices for cyclic fatigue testing, steel specimens.

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

Для механических усталостных испытаний образцов стальных материалов применяют различные типы испытательных машин, установок, стендов и устройств одно- или двухчастотным нагружением [1]. Большинство из них основано на использовании кинематической схемы, консольного или чистого изгиба с применением различных кривошипных механизмов, шатунов, вибраторов, гидроцилиндров, пружин, рычагов и других узлов и вспомогательных устройств [1; 2]. Такая схема имеет недостатки из-за сложности регулирования амплитуды нагружения, необходимости иметь множество разноразмерных элементов, усложняющих установку уровня напряжений, снижающих функциональные возможности и производительность механических испытаний. Сложность реализации данного

принципа усугубляется дороговизной и громоздкостью оборудования, большими временными и трудозатратами при переналадке устройства под задачу испытаний и низкая производительность механических испытаний. К тому же большинство такого оборудования основано на одночастотном нагружении испытываемого образца.

При испытании образца на усталость с помощью двухчастотного нагружения увеличивается информативность получаемой информации, а на практике, в основном встречаются случаи, когда на образец или изделие одновременно воздействуют две частоты нагружения (низкочастотная и высокочастотная компоненты) [3].

Цель работы – повышение эффективности, производительности испытаний и расширение функциональных возможностей испытательного

оборудования при мало- и многоцикловых испытаниях образца при изгибе с применением одно- или двухчастотного нагружения.

На рисунке 1 показана схема устройства для механических испытаний образцов на усталость (а), фронтальный вид (б) размещения дополнительных силовозбудителей для создания в образце одно- или двухчастотного нагружения и примерный закон изменения создаваемых напряжений в испытуемом образце (в).

При двухчастотном нагружении на обоих концах образца независимо друг от друга создаются разновеликие по частоте и амплитуде изгибающие моменты. Подбором диаметров дополнительных силовозбудителей с помощью индикатора прогиба устанавливают необходимую величину прогибов Δ_1 и Δ_2 обоих концов образца, создавая в его центре максимальные изгибные напряжения низкой частоты (НЧ) при квазинизком (доли Герца) и высокочастотном (ВЧ) нагружении. Один конец образца подвергается НЧ циклированию с частотами $f^1, 2f^1, 3f^1, 4f^1$, второй – высокочастотному с частотой f^2 или $2f^2$. В результате вблизи его центра возникают усталостные трещины, снижающие прочность и приводящие к разрушению.

При наличии на диске первого двигателя с НЧ четыре подшипника с разными диаметрами (D_1, D_2, D_3, D_4) вместо одного, и соблюдая неравенство $D_1 < D_2 < D_3 < D_4$, а на диске с ВЧ два подшипника вместо одного, тем самым, во столько же раз происходит увеличение номиналов НЧ и ВЧ компонент частот нагружения за один оборот вращения вала.

В итоге коэффициент полезного действия низкочастотных испытаний повышается в 4 раза. Меняя поочередно последовательность размещения подшипников, можно изменять алгоритм нагружения в соответствии с целями эксперимента. Аналогично установив на второй диск с ВЧ-нагружением, например, 2 силовых элемента вместо одного, получим двойной эффект [4].

В зоне образования максимальных напряжений (вблизи центра образца) с увеличением N (количество циклов нагружения) преобразователем Баркгаузена (ПБ) измеряют уровень магнитного сигнала, зависящего от Δ, f, N и физико-механических свойств (ФМС) образца. Построив и проанализировав зависимости уровня сигнала от Δ, f, N , соотношений f^1/f^2 , или кривые усталости с увеличением N , можно оценить влияние одно- и двухчастотного нагружения и его алгоритма на усталостную прочность и ФМС образца. То есть, меняя алгоритмы нагружения обеих ветвей нагружения и их комбинации, можно оценить их влияние на прочность и ФМС испытуемого образца.

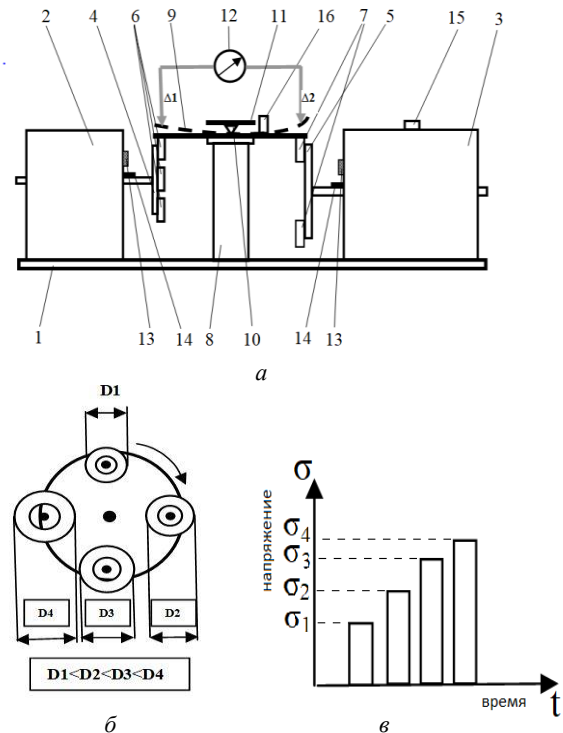


Рисунок 1 – Схема устройства для повышения эффективности механических испытаний на усталость при двухчастотном нагружении образца (а), фронтального расположения силовозбудителей (б) и график закона изменения нагрузки на образец: 1 – станина; 2 – НЧ-двигатель; 3 – ВЧ-двигатель; 4, 5 – стальные диски; 6, 7 – подшипники качения; 8 – основание; 9 – образец; 10 – призма; 11 – пластина; 12 – индикатор прогиба; 13 – герконы; 14 – постоянные магниты; 15 – счетчик числа оборотов; 16 – преобразователь Баркгаузена

Пересчет прогибов Δ_1 и Δ_2 в значения создаваемых в любой точке поверхности образца механических напряжений σ (в МПа) производится с помощью формул сопромата с учетом размеров образца, упругих постоянных стали и расстояний между местом приложения силы и точкой измерения сигнала.

Для нагружения образца НЧ (малоцикловая усталость) использовался однофазный реверсивный электродвигатель типа РД-09 с коэффициентом передачи (редукцией), равной 1/137 и частотой вращения вала двигателя $n = 8,8$ об/мин ($f_1 = 0,15$ Гц), что позволяет создавать в образце не только упругие, но и пластические деформации с разными частотными комбинациями НЧ и ВЧ-ветвей. Для ВЧ нагружения использовался электродвигатель переменного тока ДАСМ-2УХЛ4 с номинальной скоростью $v = 2900$ об/мин (частота циклирования образца 21 Гц). Меняя напряжение питания двигателя можно изменять частоту f^2 нагружения образца в пределах от 14 до 48 Гц.

Изменения ФМС испытуемого образца в зависимости от закона нагружения при одно- или

двухчастотном нагружении при малоцикловых ($N < 10^5$ циклов) или многоцикловых ($N > 10^5$) испытаниях регистрировались с помощью ПБ и магнитошумовой аппаратуры, разработанной и созданной в ИПФ НАНБ.

Методика и устройство с повышенной производительностью механических испытаний и контроля с применением дополнительных силовых элементов и широкой вариативностью установочных параметров могут быть использованы в лабораторных и заводских условиях для исследования усталости и ФМС материала благодаря снижению материальных, временных и трудовых затрат.

УДК 621

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ
АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМОЙ**
Васильцов К.А., Казеко Д.Н., Баранова В.С., Лешкевич С.В., Саечников В.А.

*Белорусский Государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Разработана система контроля и управления движением аэродинамической платформы для предполетных испытаний студенческих наноспутников в лабораторных условиях.

Ключевые слова: аэродинамическая платформа, предполетные испытания, управление движением.

**DEVELOPMENT OF AN AERODYNAMIC PLATFORM MOTION CONTROL
AND CONTROL SYSTEM**

Vasiltsov K., Kazeka D., Baranova V., Liashkevich S., Sajechnikov V.

*Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. A system for monitoring and controlling the movement of an aerodynamic platform for pre-flight tests of student nanosatellites in laboratory conditions has been developed.

Keywords: aerodynamic platform, pre-flight tests, motion control.

*Адрес для переписки: Казеко Д.Н., ул. Курчатова, 5, г. Минск, 220108, Республика Беларусь
e-mail: dkazeko@gmail.com*

Введение. Платформа разрабатывается для тестирования системы управления движением наноспутника или беспилотного летательного аппарата в условиях имитации невесомости в лабораторных условиях. Платформа левитирует на воздушном подшипнике над горизонтально выровненной стеклянной поверхностью. Движение осуществляется с двумя поступательными степенями свободы и одной вращательной с использованием электродвигателей для коррекции движения [1]. Прототип устройства представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Прототип подвижной аэродинамической платформы

Литература

1. Школьник, Л.М. Методика усталостных испытаний / Л.М. Школьник. – М. : Металлургия, 1978. – 300 с.
2. Испытательная техника : справочник: в 2-х кн.; под ред. В.В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1982. – Кн. 1. – 528 с.
3. Бусько, В.Н. Лабораторная установка для испытаний образцов на усталость с помощью бигармонического нагружения / В.Н. Бусько // Приборы и методы измерений. – 2015. – № 2. – С. 181–187.
4. Устройство для механических испытаний на усталость ферромагнитных образцов бигармоническим нагружением : пат. РБ № 13191 / В.Н. Бусько. – Оpubл. 30.06.2023.

Устройство аэродинамической платформы. Платформа состоит из напечатанной на 3D-принтере пластины с профилированными каналами, воздушного микрокомпрессора, подруливающего устройства и системы управления платформой.

Микрокомпрессор подает воздух на воздушные каналы, создавая зазор между платформой и опорной поверхностью, на которой находится платформа (воздушный подшипник [2]). Макет несущей части платформы представлен на рисунке 2. Макет подруливающего устройства представлен на рисунке 3.

Система управления платформой обеспечивается микроконтроллером Raspberry Pi Pico. Для приема внешнего управляющего сигнала на платформу используется ИК-приемник. В качестве подруливающего устройства используется два электродвигателя управляемых драйвером L9110S. Принципиальная электрическая схема модуля управления аэродинамической платформой представлена на рисунке 4.

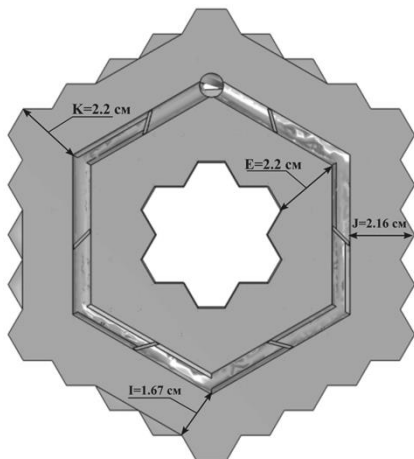


Рисунок 2 – 3D-модель макета несущей части аэродинамической платформы

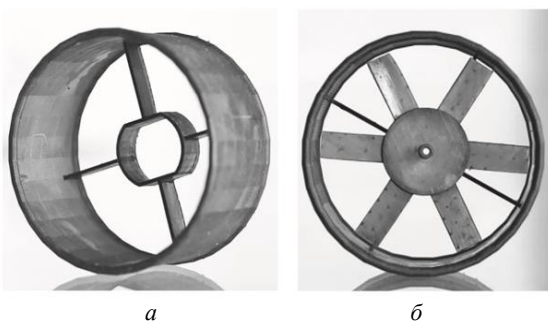


Рисунок 3 – Макет подруливающего устройства: а – корпус; б – макет в сборе

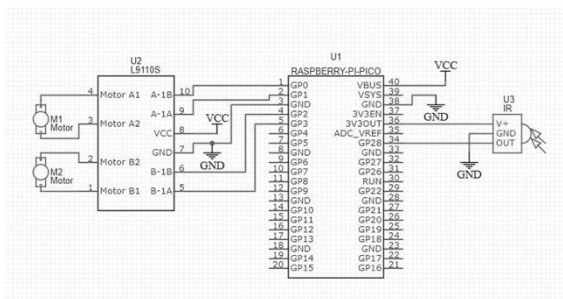


Рисунок 4 – Принципиальная электрическая схема модуля управления подруливающим устройством

Локализация и управление. Система определения угла поворота и локализации несущей части аэродинамической платформы относительно неподвижной опорной структуры реализована на основе комплексирования данных внешних оптической камеры и лидара. Оптическая камера с модулем обработки видео последовательности является источником угла φ и направления поворота. Для определения угла поворота используется опорный маркер, расположенный на платформе и метод корреляционного анализа- сопоставления масок с изображением опорного маркера при вращении платформы. Опорный маркер представляет собой две логарифмические спирали, одна из

которых является зеркальным отображением первой. В качестве модуля камеры используется Raspberry Pi v2 с полем зрения 79° и размером области изображения 640×480 .

На основе данных лидара с областью сканирования 360° и угловым разрешением $0,3^\circ$, рассчитываются координаты (X_i, Y_i) и скорость \vec{V} подвижной части платформы относительно неподвижной с частотой обновления 1 с. Диаграммы точек сканирования перемещения платформы представлены на рисунке 5.

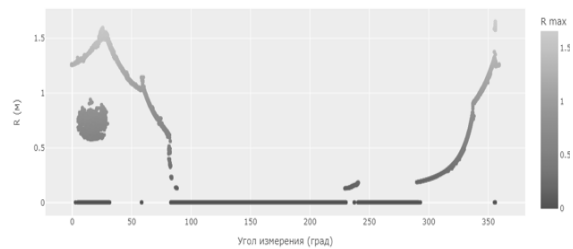


Рисунок 5 – Диаграмма точек сканирования перемещения аэродинамической платформы

На выходе системы контроля движения формируется вектор состояния (φ, X_i, Y_i) , которые передаются в вычислительную часть для формирования команд корректировки положения на микроконтроллере подруливающих устройств. Далее формируется управляющий сигнал, который представляет собой набор действий для платформы, в частности работа двигателей в одном из четырех режимов (вперед, назад, влево, вправо) и время работы в определенном режиме.

На рисунке 6 представлена схема управления перемещением платформы.



Рисунок 6 – схема управления перемещением аэродинамической платформы

Результаты. В результате работы был сконструирован прототип устройства позволяющий протестировать систему контроля и управления движением платформы. Зазор между платформой и поверхностью составляет около 100 мкм, чего хватает для плавного движения платформы без сопротивления на поверхности. Полученная платформа способна перемещаться по выделенной поверхности посредством управления внешним устройством и имеет номинальную тягу подруливающего устройства в 0,08 Н, общий вес

платформы составил 0,7 кг, а вес, который способна переносить платформа, составляет 1,5 кг.

Литература

1. Проектирование аэродинамической платформы для предполетных испытаний наноспутников / В.С. Баранова [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения. – 2022. – Вып. 11.
2. Dynamic air-bearing hardware in-the-loop testbed to experimentally evaluate autonomous spacecraft proximity maneuvers / R. Zapulla [et al.] // Journal of Spacecraft and Rockets. – 2017. – Vol. 54, № 4.

УДК 621.317, 537.58

ТЕСТИРОВАНИЕ И КАЛИБРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОВЕРХНОСТИ СО СТАТИЧЕСКИМ ЗОНДОМ Воробей Р.И., Гусев О.К., Жарин А.Л., Микитевич В.А., Пантелеев К.В., Свистун А.И., Самарина А.В., Тявловский А.К., Тявловский К.Л.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Предлагается методика тестирования и калибровка измерительного преобразователя электрического потенциала поверхности со статическим зондом. Процедура калибровки заключается в сравнении сигналов измерительного преобразователя электрического потенциала поверхности при контроле поверхности изделия и эталонного образца. Калибровка достигается изменением положения отсчетного электрода относительно электродов эталонного образца и изменением напряжений, подаваемых на его электроды.

Ключевые слова: поверхность, электрический потенциал, однородность, статический зонд, калибровка.

TESTING AND CALIBRATION OF THE MEASURING CONVERTER OF THE SURFACE ELECTRICAL POTENTIAL WITH A STATIC PROBE

Vorobey R.I., Gusev O.K., Zharin A.L., Mikitevich U.A., Pansialeyeu K.U., Svistun A.I., Samarina A.V., Tyavlovsky A.K., Tyavlovsky K.L.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The testing and calibration methodology for the measuring converter of the surface electrical potential with a static probe is proposed. The calibration procedure includes comparison of output signals of the measuring converter obtained when monitoring the surface of the sample under study and a reference sample. Calibration is achieved by repositioning the reference electrode in relation to the electrodes of the reference sample and changing the voltages applied to its electrodes.

Key words: surface, electric potential, homogeneity, static probe, calibration.

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

При контроле и исследовании свойств изделий и материалов с прецизионными поверхностями часто применяются бесконтактные методы измерения электрического потенциала поверхности, основанные на методе Кельвина [1; 2]. Несмотря на необходимость увеличения площади зонда по сравнению с устройствами, использующими вибрирующий зонд, методики измерения с неподвижным зондом имеют ряд преимуществ и расширяют область применения измерений электрического потенциала поверхности в контроле изделий с прецизионными поверхностями [3].

Одним из факторов, влияющих на формирование измерительного сигнала, особенно при относительно больших размерах зонда в статической методике измерения, является неоднородность поверхности под отсчетным электродом. Даже для изделий с прецизионными поверхностями характерно микрон неоднородное пространственное распределение электрического потенциала поверхности. Микрон неоднородность распределения электрического потенциала поверхности связана с различиями в работе выхода электрона на микрочастках поверхности с различной плотностью

дефектов разной физической природы. Под пространственной микронеоднородностью поверхности понимается существование дефектов поверхности с размерами существенно меньшими размеров отсчетного электрода. Невозможность проведения измерений с пространственным разрешением менее размеров отсчетного электрода в случае статического зонда [1; 3] вызывает необходимость описывать природу формирования потенциала поверхности моделью эффективной работы выхода [4]. В этой модели измеряемое значение электрического потенциала обуславливается не определенными поверхностными состояниями, а средним значением работы выхода микроучастков на поверхности, а наблюдаемые изменения поверхностного потенциала могут быть вызваны не изменением работы выхода электрона на дефектах нового типа, а только изменением соотношения площадей микроучастков поверхности с разным составом дефектов [4]. Математическое моделирование формирования измерительного сигнала в потенциально-зондовых методах при микронеоднородном распределении свойств поверхности показывает сложную зависимость измерительного сигнала от различных факторов [5].

Бесконтактные измерения электрического потенциала поверхности имеют ряд методических особенностей [1–6], что приводит к необходимости их учета при контроле свойств материалов и изделий, разработке средств калибровки и метрологического обеспечения применяемых методик неразрушающего контроля.

Исследование свойств поверхности различных изделий показывает, что поверхность контролируемого образца S в проекции зонда Z (рисунок 1) можно представить не более чем четырьмя составляющими. Например, основным участком поверхности a , скоплением точечных дефектов b , относительно большим микронеоднородным участком c поверхности с отличающимся от участка a потенциалом, линейным дефектом d или их скоплением. При моделировании измерительного сигнала в соответствии с моделью эффективной работы выхода [4] реальная поверхность (рисунок 1, a) может быть заменена на ее эквивалент с замещающими составляющими a^* , b^* , c^* , d^* (рисунок 1, b).

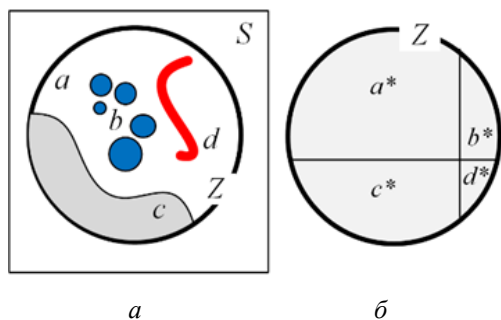


Рисунок 1 – Схема замещения реальной поверхности S (a) ее моделью (b)

Для проведения процедуры калибровки измерительного преобразователя электрического потенциала поверхности со статическим зондом предлагается использовать эталонный образец, образованный четырьмя металлическими поверхностями A , B , C , D (рисунок 2).

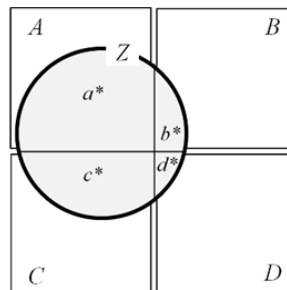


Рисунок 2 – Схема калибровки измерительного преобразователя электрического потенциала поверхности

Изменением положения отсчетного электрода Z относительно электродов эталонного образца и изменением напряжений, подаваемых на электроды A , B , C , D , которые моделируют участки поверхности a^* , b^* , c^* , d^* (рисунок 1, b), можно добиться равенства параметров измерительных сигналов, получаемых при контроле реальной поверхности S и процедуре калибровки по предлагаемой схеме (рисунок 2). Необходимо отметить, что в параметры формирования измерительного сигнала в случае микронеоднородного распределения электрического потенциала под отсчетным электродом включается зависимость измеряемого потенциала от межэлектродного зазора контролируемая поверхность – отсчетный электрод зонда.

В схеме калибровки измерительного преобразователя с применением частичных эталонных электродов может быть решена и обратная задача. При этом для различных сочетаний напряжений на электродах A – D и их коэффициентов влияния, изменяемых соотношением площадей этих электродов в проекции зонда Z формируется зависимость измерительного сигнала от параметров процедуры калибровки. Это позволяет уже в процессе контроля поверхности изделия оценить параметры ее микронеоднородности.

Предлагаемая методика тестирования и калибровки измерительного преобразователя электрического потенциала поверхности со статическим зондом отличается простотой аппаратной реализации, но требует набора большой базы зависимостей измерительного сигнала от совокупности частичных напряжений на электродах эталонного образца и коэффициентов влияния их вклада по соотношению площадей участков A , B , C , D в проекции зонда.

Литература

1. Kronik, L. Surface photovoltage phenomena: theory, experiment, and applications / L. Kronik, Y. Shapira // Surface Science Reports. – 1999. – № 37. – P. 1–206.

2. Noras, A. Non-contact surface charge/voltage measurements. Capacitive probe – principle of operation / A. Noras // *Trek*. – 2002. – № 3001. – P. 2–8.

3. Измерение электрического потенциала поверхности с использованием статического зонда / К.Л. Тявловский [и др.] // *Приборы и методы измерений*. – 2023. – Т. 14, № 2. – С. 135–144.

4. Woodall, I.M. Summary Abstract: Are they really Schottky barriers after all? / I.M. Woodall, I.L. Freouf // *J. Vac. Sci. Technol.* – 1982. – V. 21, № 2. – P. 574–576.

5. 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.

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 539.1.05

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО АМПЛИТУДНОГО АНАЛИЗАТОРА, ВСТРАИВАЕМОГО В FPGA ARTIX7 ПЛАТЫ ЭЛЕКТРОНИКИ СЧИТЫВАНИЯ ROESTI СТРОУ-ТРЕКЕРА ПРОЕКТА СОМЕТ

Воропай Е.С.², Евтухович П.Г.¹, Коваленко М.Н.², Павлов А.Л.¹, Понарядов В.В.², Рутковская Л.С.²

¹*Объединенный институт ядерных исследований
Дубна, Российская Федерация*

²*Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Целью работы является разработка встраиваемого полностью цифрового амплитудного анализатора, встраиваемого в FPGA платы электроники считывания ROESTI, что дает возможность проводить выравнивание коэффициентов передачи по каждому каналу и тем самым проводить калибровку по амплитуде каждого канала регистрации сигналов со строу-трубок. Амплитудный анализатор апробирован на плате ROESTI с использованием сигналов сцинтилляционного детектора и строу-трекера от тестовых источников ионизирующего излучения.

Ключевые слова: АЦП, амплитудный анализатор, строу-трекер.

DEVELOPMENT OF A DIGITAL AMPLITUDE ANALYZER BUILT INTO THE FPGA ARTIX7 ELECTRONICS BOARD FOR READING THE ROESTI STRAW TRACKER OF THE COMET PROJECT

Voropay E.S.², Evtukhovich P.G.¹, Kovalenko M.N.², Pavlov A.L.¹, Ponaryadov V.V.², Rutkovskaya L.S.²

¹*Joint Institute for Nuclear Research
Dubna, Russian Federation*

²*Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The goal of the work is to develop a built-in fully digital amplitude analyzer built into the FPGA of the ROESTI readout electronics board, which makes it possible to equalize the transmission coefficients for each channel and thereby calibrate the amplitude of each channel for recording signals from straw tubes. The amplitude analyzer was tested on the ROESTI board using signals from a scintillation detector and a straw tracker from ionizing radiation sources.

Key words: ADC, amplitude analyzer, straw tracker.

*Адрес для переписки: Коваленко М.Н., пр. Независимости, 4, г. Минск, 220030, Республика Беларусь
e-mail: kovalenkom@bsu.by, тел. (029)6100263*

Эксперимент СОМЕТ нацелен на поиск когерентного безнейтринного перехода мюона в электрон в мюонном атоме ($\mu\text{-e}$ конверсия), $\mu^- + N(A,Z) \rightarrow e^- + N(A,Z)$, на протонном исследовательском ускорительном комплексе (J-PARC) в Токай, Япония. $\mu\text{-e}$ конверсия – это редкий процесс, который нарушает закон сохранения лептонного числа в заряженном лептонном секторе. Одной из систем детектирования эксперимента СОМЕТ является трекер – сборка из пяти модулей, каждый из которых представляет собой кольцо с двумя парами рядов строу-трубок

перпендикулярных друг другу. Считывание информации в каждом модуле осуществляется через 16-канальные платы электроники ROESTI, расположенные вдоль кольца. Трекер находится внутри сверхпроводящего соленоида, создающего магнитное поле 1 тесла.

Сигнал с каждой строу-трубки после прохождения через нее заряженной частицы, представляет собой импульсный скачок напряжения. Он должен быть усилен, сформирован по длительности с сохранением амплитуды и, если он выше порога, далее оцифрован и записан для дальнейшей

компьютерной обработки. Схема функционирования платы ROESTI, на которую поступает информация с 16 строу-трубок, показана на рисунке 1.

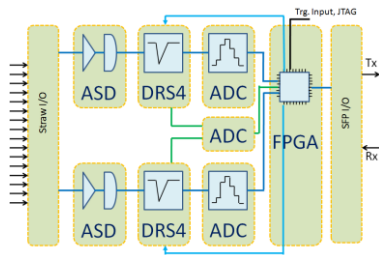


Рисунок 1 – Схема функционирования платы ROESTI

ASD – микросхема, содержащая предусилитель, формирователь и дискриминатор, задающий порог пропускания импульса на последующую обработку, DRS4 – микросхема, так называемый диджитайзер, в которой вся временная шкала, содержащая импульс, разбита на 1024 ячейки, содержащие информацию в виде заряда на конденсаторах, каждый из которых потом последовательно оцифровывается в ADC (АЦП). Информация о всех сработанных каналах трекера передается в FPGA (программируемая пользователем вентиляционная матрица), которая осуществляет хранение данных, их прием-передачу в компьютер, мониторингирование и контроль параметров, обеспечивающих функционирование платы.

В соответствии с данной принципиальной схемой были изготовлены платы ROSTI (рисунок 2) и произведена прошивка FPGA необходимым программным обеспечением.

Разработанный нами встраиваемый цифровой анализатор дает возможность проводить выравнивание коэффициентов передачи по каждому каналу и тем самым проводить калибровку по амплитуде каждого канала регистрации сигналов со строу-трубок.

Весь программный блок, обеспечивающий функционирование платы ROESTI, запрограммирован в ARTIX7, и при этом остается свободным достаточно большой ресурс логики и памяти, который и был использован для встраивания туда цифрового анализатора.

Сравнительный анализ амплитудных спектров с каждого канала позволит получить коэффициенты относительной чувствительности всего тракта регистрации событий от строу-трекера до АЦП и тем самым нормализовать чувствительность каналов многоканальной системы.

Реализация амплитудного анализатора для 16 каналов была выполнена в САПР Vivado с использованием типового процессора Microblaze и оригинального IP блока, содержащего конечные автоматы поиска максимума амплитуды входных импульсов и накопителя данных, выполненного на базе встроенной в FPGA двухпортовой памяти, работающей в режиме считывание-модификация-запись. Амплитудный анализатор был добавлен к

основному проекту платы электроники считывания и использовал данные 12 разрядного 16-канального АЦП конвейерного типа, что обеспечило мертвое время анализа амплитуд в 10 нс. Тактовая частота работы АЦП составляла 100 МГц, а частота работы IP ядра амплитудного анализатора – 200 МГц.

Для передачи накопленных данных использовался встроенный интерфейс SiTCP, работающий в режимах UDP и RBCP. При отладке программного обеспечения и IP ядер FPGA мы использовали стандартный последовательный интерфейс.



Рисунок 2 – Плата электроники считывания ROESTI

Тестирование амплитудного анализатора на плате ROESTI проводилось на сигналах с ФЭУ136 со сцинтиллятором NaI(Tl) и с использованием источников ионизирующего излучения Cs137, и Na22, после отладки программы был зарегистрирован спектр железа Fe55 с помощью строу-трубки диаметром 5 мм, длиной 500 мм с использованием источника ионизирующего излучения Fe55, размещенном на расстоянии 50 мм от середины строу-трубки и оснащенным свинцовым коллиматором диаметром 3 мм.

Зарегистрированные амплитудные спектры приведены на рисунках 3 и 4.

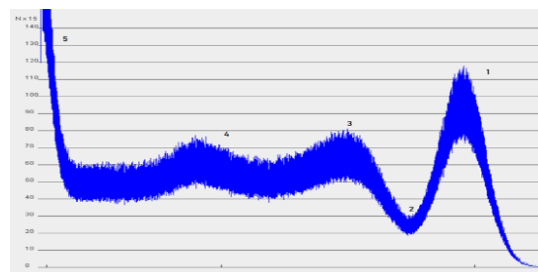


Рисунок 3 – Амплитудный спектр импульсов изотопа Cs137

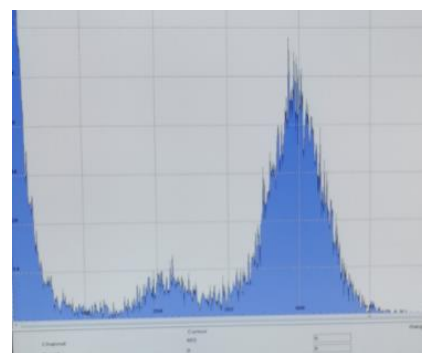


Рисунок 4 – Амплитудный спектр Fe55 зарегистрированный строу-трубкой 5 мм диаметром

Степень размытия аппаратурного спектра мы оценивали, вычислив величину энергетического разрешения R , которая определяется отношением ширины пика ΔE , взятой на уровне половины его максимальной высоты, к энергии частиц E_γ .

$$R = \Delta E / E.$$

Расчет для пика полного поглощения Cs-137, дает разрешение 0,12.

Пик электрон-позитронной аннигиляции Na-22, дает значение разрешения $R = 0,17$.

Литература

1. Будыка, А.К. Спектрометрия ионизирующих излучений / А.К. Будыка. – М. : НИЯУ МИФИ, 2021. – 223 с.
2. Илюхин, А.В. Устройства цифровой автоматики / А.В. Илюхин, И.И. Зарипова. – М. : МАДИ, 2020. – 141 с.
3. Никамин, В.А. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи: справочник / В.А. Никамин. – М. : Альтекс-А, 2003. – 217 с.

УДК 528.721.212.4

МАНИПУЛЯТОР «ОПТИЧЕСКАЯ МЫШЬ» – ДАТЧИК ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В УЧЕБНЫХ ОПЫТАХ ПО ФИЗИКЕ

Ворсин Н.Н.

*Брестский государственный технический университет
Брест, Республика Беларусь*

Аннотация. Приведены результаты использования компьютерного манипулятора «оптическая мышь» в качестве датчика перемещения в учебных опытах по физике. Показано, что простейший манипулятор при хорошей настройке обеспечивает относительную погрешность измерений, не превышающую 1–15 %, что вполне удовлетворяет условиям учебных опытов.

Ключевые слова: манипулятор оптическая мышь, учебный опыт, компьютеризация.

MANIPULATOR "OPTICAL MOUSE" – MOTION SENSOR IN PHYSICS TRAINING EXPERIMENTS

Vorsin N.N.

*Brest State Technical University
Brest, Republic of Belarus*

Abstract. The results of using a computer manipulator "optical mouse" as a displacement sensor in educational experiments in physics are presented. It is shown that the simplest manipulator, with good settings, provides a relative measurement error not exceeding 1–15 %, which fully satisfies the conditions of educational experiments.

Key words: optical mouse manipulator, learning experience, computerization.

Компьютеризация учебных лабораторий является очевидным и неизбежным компонентом развития образования. При этом желательно минимизировать стоимость преобразований лабораторного оборудования. Одним из методов этого является максимальное использование стандартного компьютерного оборудования для постановки лабораторных экспериментов. Ниже приводится

некоторый опыт применения компьютерного манипулятора «оптическая мышь» в качестве датчика перемещения в опытах по механике.

Конечно, мышь не является измерительным инструментом для точного измерения перемещения. Ей присущи такие эффекты как проскальзывание – пропуск перемещения или наоборот – обнаружение несуществующего перемещения.

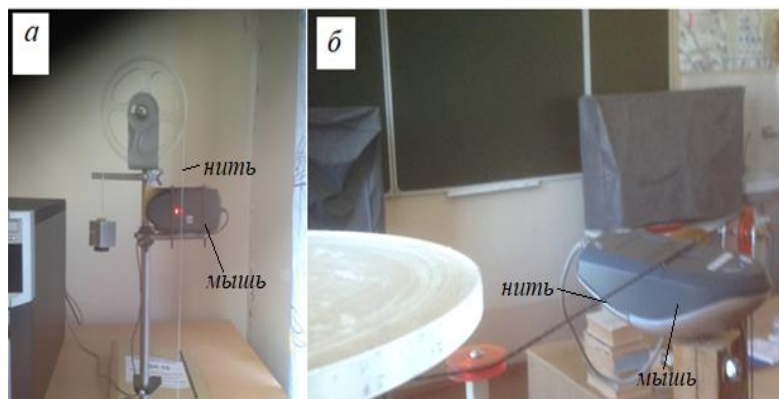


Рисунок 1 – Расположение манипулятора перед вертикально (а) и горизонтально (б) идущей нитью

Для управления курсором на экране это не имеет значения, поскольку оператор, двигая мышью, компенсирует данные погрешности, не замечая их. Если использовать мышью как измеритель перемещения, то она будет давать некую погрешность, которую следует оценить с точки зрения результатов учебных опытов.

Манипулятор «оптическая мышь» представляет собой видеокамеру низкого разрешения, которая с большой частотой кадров и большим увеличением фотографирует находящуюся под ней поверхность. Увеличение позволяет обнаруживать микроструктуру поверхности: неровности, поры, плетение нитей и т. п. Затем входящий в состав мыши микропроцессор сравнивает между собой кадры полученной их последовательности и определяет направление и величину перемещения мыши над поверхностью. Эта информация передается в компьютер, который осуществляет соответствующее перемещение курсора на экране монитора.

На рисунке 1 показаны варианты размещения мыши в опытах с машиной Автвуда – а и установкой для измерения момента инерции тел – б. В обоих случаях мышь определяет перемещение тянущей нити, которая проходит перед ее «зрачком». При этом используется драйвер оптической мыши операционной системы, который допускает подключение нескольких мышек. В этом случае курсор на экране управляется всеми подключенными манипуляторами. В нашем случае оказываются подключены две мыши. Одна из них измеряет перемещение нити, назовем ее измерительной, другая, которую назовем основной, используется в обычном назначении. Это обстоятельство не создает серьезных неудобств, поскольку при проведении опыта основной манипулятор находится в покое, а в остальное время покоится измерительный манипулятор.

Использовалась простейшая офисная мышь, основанную на датчике ADNS 2610 или аналогичном ему ADNS2620, или PAN3101 и т. п. Фоточувствительная матрица этого датчика содержит 18×18 пикселей и допускает скорость движения до 0,3 м/с. Частота съемки кадров равна 1500 1/с.

При постановке учебного опыта всегда имеется возможность подбора его параметров, удовлетворяющих неким исходным условиям, в частности, характеристикам датчиков. Можно легко обеспечить условия, при которых скорость движения не превысит, например, 0,3 м/с и подобрать материал нити, дающий достаточный контраст изображений.

Первые оптические мыши и драйверы к ним были максимально простыми. Они линейно превращали полученные перемещения манипулятора

по осям X и Y в перемещение курсора на экране. Однако затем в функцию соотношения перемещений начали вносить нелинейность, которая улучшает точность установки курсора без уменьшения средней скорости его движения по экрану. Эту нелинейность следует выключить – снять галочку «повышенная точность установки указателя» в настройках драйвера мыши.

На рисунке 2 представлены результаты опытов по определению длины тянущей нити в установке, показанной на рисунке 1, б. Нить, намотанная на цилиндр, движется под действием привязанного к ней груза и раскручивает измеряемое тело. Движение груза и нити близко к равноускоренному, что отражается квадратичной зависимостью начального участка графика. После полного разматывания цилиндр и измеряемое тело продолжают движение по инерции, а нить начинает наматываться на цилиндр, изменив направление движения, – падающий участок графика. При этом груз поднимается до некоторой высоты, по которой затем оценивается средняя сила трения. Длина нити определится высотой пика на графике, которая не остается неизменной от опыта к опыту.

Опыт проводился многократным повторением (50 раз) записи пройденного нитью пути с последующей обработкой результатов. На рисунке 2 показаны среднее значение результата (67 см), доверительный интервал для вероятности 0,95 (1,2 см). При этом максимальная относительная погрешность, даваемая датчиком, составляет около 1 %. Далеко не каждый измерительный прибор в учебной лаборатории можно отнести к классу точности 1.

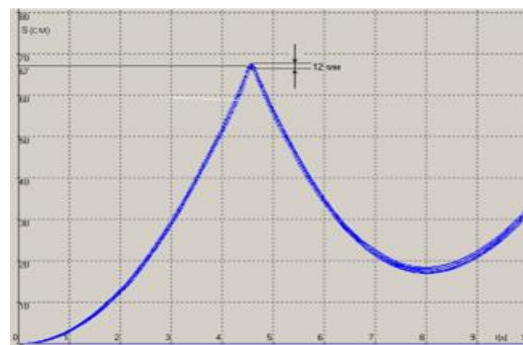


Рисунок 2 – Записи 50-ти кратного повторения опыта измерения длины тянущей нити. Средняя длина 67 см, дисперсия 2 мм, доверительный интервал при 95 % вероятности 6 мм, относительная максимальная погрешность 1 %

Это позволяет утверждать, что даже простейшая оптическая мышь может быть неплохим, пусть не сертифицированным, измерительным инструментом и вполне подходит для организации учебных опытов.

УДК 621.383

УПРАВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ С МНОГОЗАРЯДНОЙ ПРИМЕСЬЮ

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

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Описан способ управления характеристиками фотоэлектрических преобразователей на основе полупроводников с многозарядной примесью, использующий дополнительный управляющий сигнал с широтноимпульсной модуляцией. Применение метода широтно-импульсной модуляции для управления коэффициентами преобразования функциональных преобразователей позволяет реализовать управление преобразовательными характеристиками в широком диапазоне.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, полупроводник, многозарядная примесь, управление характеристикой чувствительности, широтно-импульсная модуляция.

CONTROLLING THE CHARACTERISTICS OF PHOTOELECTRIC CONVERTERS BASED ON SEMICONDUCTORS WITH MULTICHARGED DOPANTS

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

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The method of controlling the characteristics of photoelectric converters based on semiconductors with multicharged dopants contains using an additional control signal with a pulse-width modulation. The use of pulse-width modulation method to control the transformation factor of functional converter allows one to control the transformation characteristics in a wide range.

Key words: photoelectric converter, semiconductor, multicharged dopant, control of the sensitivity characteristic, pulse-width modulation.

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

Одним из способов решения многообразных задач оптической диагностики является использование фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на основе полупроводников с собственной фотопроводимостью, слабо легированных глубокими примесями, формирующими в запрещенной зоне несколько энергетических уровней с разными зарядовыми состояниями. Особенности физических процессов перезарядки этих уровней обеспечивают на функциональном уровне комплекс новых качественных и количественных характеристик и позволяют создавать фотоприемники для преобразования различных сочетаний входных воздействий на основе ряда простых приборных структур [1; 2].

Многозарядный примесный M -центр (МПЦ) может содержать от 0 до M электронов и соответственно, находиться в $(M + 1)$ различных зарядовых состояниях (рисунок 1). При пустом центре для электрона существует основное вакантное состояние, описываемое локальным уровнем энергии E_1 . При заполнении уровня E_1 для электронов «возникает» новое квантовое состояние с энергией E_2 , которое может быть занято вторым захваченным электроном [2].

Примечательно, что уровни энергии E_2 не существует, пока уровень E_1 не занят хотя бы одним электроном. Само существование активного уровня и энергетический спектр многозарядной примеси определяется занятостью уровней центра и не может быть представлено набором независимых уровней.

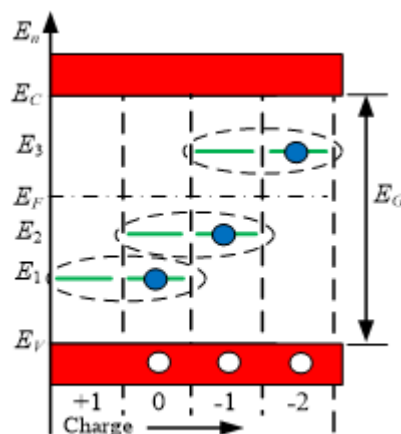


Рисунок 1 – Энергетическая диаграмма примесного центра с четырьмя зарядовыми состояниями

При изменении зарядового состояния примеси, например, под действием оптического излучения, время жизни и скорость рекомбинации носителей заряда может быть изменена на несколько десятичных порядков (рисунок 2). Значения интенсивности оптического излучения, при которых происходит изменение зарядовых состояний МПЦ обозначены как P_L и P_H .

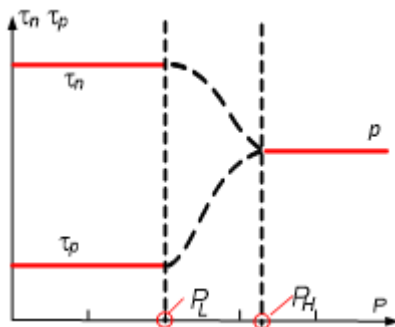


Рисунок 2 – Зависимость постоянной времени рекомбинации акцепторной примеси от уровня оптического возбуждения

Для многозарядной примеси нейтральному состоянию примесного центра соответствует нижний уровень E_1 , занятый электроном и свободный уровень E_2 . При захвате электронов вышележащим уровнем, энергия нижележащего уровня уже не может проявиться из-за сильного взаимодействия между двумя электронами центра и их неразличимости.

Перезарядка уровней примеси в разных зарядовых состояниях глубокой многозарядной примеси под действием внешнего управляющего сигнала (оптического или электрического через дополнительный электрод) [1] приводит к формированию двух диапазонов энергетической и спектральной характеристик чувствительности [1; 2]. Первый диапазон соответствует линейной рекомбинации при плотностях мощности оптического управляющего сигнала, меньших порогового значения P_L , а второй диапазон характеристик – при плотностях мощности оптического излучения больших P_H . Применение ФЭП в диапазонах мощности аналогового управляющего сигнала $P_L < P < P_H$ нецелесообразно из-за высокой нелинейности и нестабильности характеристики управления.

Для реализации линейной функции управления энергетической и спектральной характеристиками чувствительности ФЭП предлагается использовать управление заселенностью энергетических уровней многозарядной примеси внешним управляющим оптическим излучением методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ), причем амплитуда интенсивности управляющего оптического излучения должна быть более P_H . При этом за время, определяемое

временем жизни носителей заряда, происходит переключение между диапазонами характеристик ФЭП. Если частота изменения измерительного сигнала не превышает частоты управляющего ШИМ сигнала, то среднее значение коэффициента преобразования ФЭП будет определяться скважностью управляющего ШИМ сигнала (рисунок 3). Применение ШИМ позволяет плавно и по линейному закону изменять наблюдаемое эффективное время жизни носителей заряда, следовательно и определяемый этим временем параметр фоточувствительности.

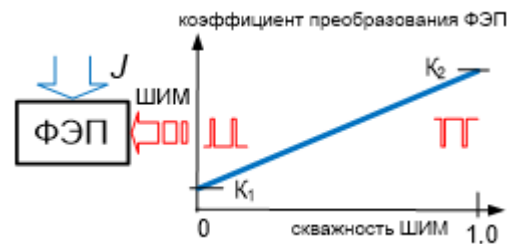


Рисунок 3 – ШИМ регулировка параметров ФЭП

Использование структур на основе полупроводникового материала с глубокой многозарядной примесью позволяет сформировать функциональные ФЭП с чувствительностью к физическим факторам различной физической природы, например, магнитному полю [3; 4]. Применение способа ШИМ регулирования для управления коэффициентами преобразования путем изменения соотношения включенных в работу энергетических уровней в разных зарядовых состояниях позволяет управлять свойствами ФЭП непосредственно в чувствительной области сенсорной структуры, что реализует управление во всем возможном диапазоне коэффициентов преобразования без снижения абсолютной чувствительности.

Литература

1. 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.
2. Фотоприемники на основе собственных полупроводников для построения измерительных преобразователей / О.К. Гусев [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2017. – № 2. – С. 34–42.
3. Магниторекомбинационный преобразователь с оптическим управлением / Р.И. Воробей [и др.] // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: сб. ст. 8-й МНТК. – М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, НАН Беларуси. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 74–78.
4. Многопараметрические измерительные преобразователи систем оптической диагностики на основе функциональных датчиков / Р.И. Воробей [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2023. – № 1. – С. 37–45.

УДК 539.1.074

ДЕТЕКТОРЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЩЕЛЕВЫХ ВОЛНОВОДОВ

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

*Университет гражданской защиты
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе показана возможность использования микрокольцевых резонаторов на основе волноводов с двумя вертикальными щелями, заполненными гиперсвязанным фторполимером, в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения. Проведен анализ изменения направляющих свойств таких волноводов под воздействием ионизирующего излучения, а также оптимизация параметров кольцевых резонаторов на их базе с точки зрения достижения максимальной чувствительности.

Ключевые слова: микрокольцевой резонатор, щелевой волновод, гиперсвязанный фторполимер, ионизирующее излучение, поглощенная доза.

DETECTORS OF IONIZING RADIATION ON THE BASE OF SLOT WAVEGUIDES

Goncharenko I.A., Il'yushonok A.V., Reabtsev V.N.

*University of Civil Protection
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. We demonstrated the possibility to use the microring resonators based on of the waveguide with two vertical slots filled with hyperlinked fluoropolymer as sensitive element of the detectors of absorbed dose of ionizing radiation. The analysis of influence of ionizing radiation on guiding properties of such waveguides and optimization of the parameters of ring resonators on that base in order to achieve the maximal sensitivity has been carried out.

Key words: microring resonator, slot waveguide, hyperlinked fluoropolymer, ionizing radiation, absorbed dose.

*Адрес для переписки: Рябцев В.Н., ул. Машиностроителей, 25, г. Минск, 220118, Республика Беларусь
e-mail: v.reabtsev@ucpr.by*

Измерения доз ионизирующего излучения находят широкое применение в атомной энергетике (контроль обстановки в реакторном зале атомных электростанций, в технологических каналах ядерных реакторов), радиационной безопасности (контроль радиационной обстановки), медицине (при радиотерапии онкологических больных, рентгеноскопическом обследовании), радиологических исследованиях. Блокам детектирования большинства традиционных дозиметров необходимо электрическое питание. Для обеспечения электрической энергией отдельных сенсорных элементов и передачи информации от них используются электрические или беспроводные соединения, которые могут нарушаться в результате аварии [1]. Детекторы на основе оптических волноводных структур имеют ряд существенных преимуществ перед традиционными устройствами. Они обладают высокой надежностью, поскольку устойчивы к электромагнитным, химическим и механическим воздействиям, а также малым весом и поперечными размерами. Для работы оптических волноводных дозиметров не требуется электрического питания чувствительного элемента, поэтому они могут продолжать работу даже при полном отключении электроснабжения. Такие дозиметры позволяют проводить измерения в режиме реального времени, а оператор может находиться на значительном удалении от контролируемого объекта [2].

Одним из широко используемых типов датчиков, обеспечивающих высокую точность измерений, являются датчики на основе волноводных микрокольцевых резонаторов [3].

Воздействие ионизирующего излучения вызывает деградацию материала волновода из-за образования дефектов и эффекта ионизации [4; 5]. Дефекты приводят к изменению оптических свойств материала в результате возникновения полос поглощения и центров окраски [6–8]. С другой стороны, под воздействием ионизирующего излучения изменяется показатель преломления и геометрическая длина резонатора, что приводит к смещению резонансной длины волны или полос интерференционной картины. Таким образом, такие структуры можно использовать для детектирования поглощенной дозы ионизирующего излучения [9].

В работе [10] экспериментально исследовано влияние больших доз гамма-излучения на кольцевой резонатор на основе волновода из аморфного кремния, расположенного на кремниевой подложке с поверхностным покрытием из гиперсвязанного фторполимера (ЭП полимера).

Под воздействием ионизирующего излучения происходит изменение показателя преломления покрывающего волновод полимера, что приводит к сдвигу резонансной длины волны кольцевого резонатора в область меньших длин волн. При дозе ионизирующего излучения 150 кГр сдвиг составляет 21 пм (рисунок 1).

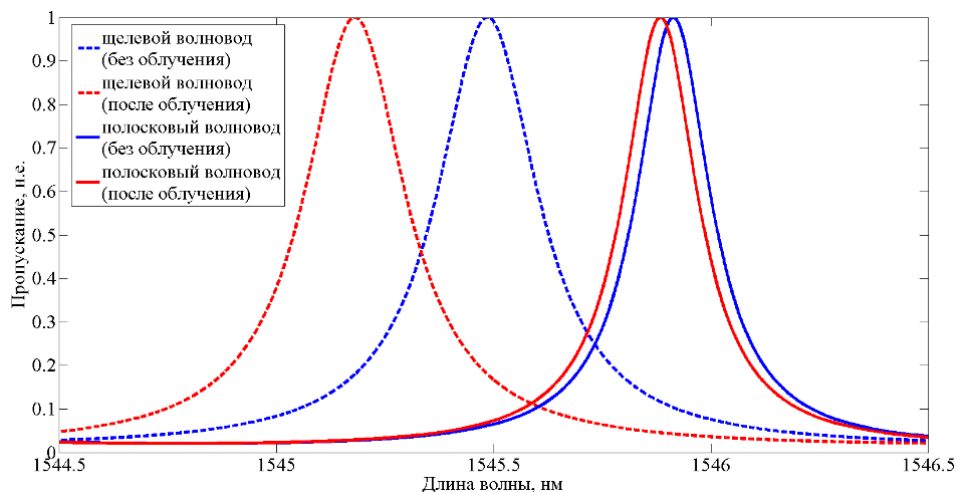


Рисунок 1 – Нормализованные функции пропускания кольцевых микрорезонаторов на базе щелевых и полосковых волноводов до и после облучения гамма-излучением дозой 150 кГр

Для повышения чувствительности детектора ионизирующего излучения возможно использование микрокольцевых резонаторов на базе щелевых волноводов. В этом случае ЭП полимер располагается в области щели, где величина оптических полей волноводной моды значительна и изменения показателя преломления ЭП полимера приводят к существенно большему смещению резонансной длины волны. При этом наибольшей чувствительностью обладают резонаторы на основе волноводов с двумя щелями. При дозе ионизирующего излучения 150 кГр сдвиг резонансной длины волны микрорезонатора на базе волновода с двумя щелями составляет 305 нм. Таким образом, чувствительность детектора ионизирующего излучения на основе таких волноводов можно повысить более чем в 10 раз.

В данной работе проведен анализ изменения направляющих свойств волноводов с двумя вертикальными или горизонтальными щелями, заполненными ЭП полимером, под воздействием ионизирующего излучения, а также проведена оптимизация параметров кольцевых резонаторов на базе таких волноводов с точки зрения достижения их максимальной чувствительности.

Для оценки чувствительности детектора ионизирующего излучения проанализирована зависимость интенсивности сигнала на выходе резонатора от поглощенной дозы гамма-излучения при различных параметрах резонатора. Чувствительность и измерительный диапазон детектора ионизирующего излучения зависит от ширины щелей, заполненных ЭП полимером, их разнесения (расстояния между щелями) и ширины волновода. Для каждой ширины щелей мы определили оптимальную с точки зрения максимальной чувствительности ширину волновода. Оптимальное

расстояние между щелями в каждом случае составляло около трети от ширины волновода.

Литература

1. Friebele, E.J. Radiation damage of optical fiber waveguides at long wavelengths / E.J. Friebele, M.E. Gingerich, K.J. Long // *Applied Optics*. – 1982. – Vol. 21, № 3. – P. 547–553.
2. *Fundamentals of Ionizing Radiation Dosimetry* / P. Andreo [et al.]. – Wiley, 2017. – 957 p.
3. Гончаренко, И.А. Оптические датчики на основе волноводных микрокольцевых резонаторов : монография / И.А. Гончаренко, В.Н. Рябцев. – Минск : УГЗ, 2022. – 185 с.
4. Damage correlations in semiconductors exposed to gamma, electron and proton radiations / G.P. Summers [et al.] // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 1993. – Vol. 40, № 6. – P. 1372–1379.
5. Johnston, A.H. Radiation effects in optoelectronic device / A.H. Johnston // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 2013. – Vol. 60, № 3. – P. 2054–2073.
6. West, R.H. Effects related to dose deposition profiles in integrated optics structures / R.H. West, S. Dowling // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 1996. – Vol. 43, № 3. – P. 1044–1049.
7. Girard, S. 14-MeV neutron, gamma-ray, and pulsed X-ray radiation-induced effects on multimode silica-based optical fibers / S. Girard, J. Baggio, J. Bisutti // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 2006. – Vol. 53, № 6. – P. 3750–3757.
8. An introduction to radiation effects on optical components and fiber optic sensors / F. Berghmans [et al.] // *Optical Waveguide Sensing and Imaging*. 1 ed. – Netherlands: Springer, 2008. – P. 127–165.
9. Гончаренко, И.А. Измерение поглощенной дозы ионизирующего излучения с помощью оптических волноводных кольцевых резонаторов / И.А. Гончаренко, А.В. Ильюшонок, В.Н. Рябцев // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2023. – Т. 7, № 1. – С. 5–12.
10. Gamma radiation effects on silicon photonic waveguides / S. Grillanda [et al.] // *Optics Letters*. – 2016. – Vol. 41, № 13. – P. 3053–3056.

УДК 621.314

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕЖВИТКОВЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ОДНОФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Громько И.Л., Мирош Д.В., Монархович И.Е.

*УО «Белорусский государственный университет транспорта»
Гомель, Республика Беларусь*

Аннотация. Разработано программное обеспечение для диагностики и раннего обнаружения межвитковых коротких замыканий в однофазных трансформаторах железнодорожной отрасли. Применение данного программного обеспечения позволит в режиме реального времени, не выводя оборудование из работы, анализировать информацию, классифицировать различные отклонения и межвитковые короткие замыкания.

Ключевые слова: трансформатор, нейронная сеть, диагностика, алгоритм, межвитковое короткое замыкание.

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR IDENTIFICATION OF INTER-TURN FAULTS IN SINGLE-PHASE TRANSFORMERS

Hramyko I.L., Mirosh D.V., Monarhovich I.E.

*Belarusian State University of Transport
Gomel, Republic of Belarus*

Abstract. Software for diagnostics and early detection of inter-turn faults in single-phase transformers in the railway industry has been developed. The application of this software will make it possible to analyse information, classify various deviations and inter-turn faults in real time 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, кв. 27, г. Гомель, 246030, Республика Беларусь
e-mail: ivangromyko95@mail.ru*

Разработка системы оценки технического состояния трансформаторов в системе железнодорожного тягового электроснабжения линий сигнализации, централизации, блокировки, предприятий железнодорожных электрических сетей (ПЭ и АБ) и на подстанциях является актуальной задачей. На сегодняшний день более 50 % трансформаторов системы электроснабжения железнодорожной отрасли страны отработали установленный срок службы – 25 лет, согласно ГОСТ 11677-85 [1].

Необходимо отметить, что за прошедшие годы была проделана большая работа по созданию методов диагностики трансформаторного оборудования, позволяющих при комплексном их применении адекватно оценить состояние обследуемого объекта с надежностью, достигающей 98 % [2]. Однако, несмотря на это, количество трансформаторов, «доживающих» до отказов по причине термохимического старения твердой изоляции, составляет по разным источникам от 7 % до 20 % [3]. То есть причиной отказа от 80 % до 93 % трансформаторов являются различные своевременно не выявленные дефекты. Данная ситуация обусловлена низкой эффективностью традиционной схемы диагностики.

Статистика по выходу из строя трансформаторов на Барановичском отделении БелЖД с 2014 по 2022 гг. указывает, что основной причиной выхода из строя являлись короткие замыкания (33,3 %),

обрывы в обмотках (22,2 %), грозовые перенапряжения (16,7 %) и другие неустановленные причины (27,8 %).

В данной работе представлена программа, детектирующая межвитковые замыкания и другие неисправности в трансформаторах, алгоритм которой представлен на рисунке 1.

Данная программа перед инициализацией получает информацию (напряжения, токи, активные мощности и коэффициенты мощностей) с энергометров PZEM-004T-100A, которые подключены обмоткам трансформатора, и формирует изображения на основе зависимости отношения данных величин между первичной и вторичной обмотками от времени [4]. Далее изображения поступают на четыре сверточные нейронные сети, каждая из которых классифицирует изображения по своим параметрам: напряжения, токи, активные мощности и коэффициенты мощностей.

Каждая нейронная сеть на выходе выдает номер класса, к которому относится неисправность трансформатора. К классу 1 относятся изображения с МКЗ на первичной обмотке, а к классу 2 – на вторичной. Класса 2 для отношений токов и активных мощностей и коэффициентов мощностей не существует, так как характер изменений этих отношений одинаков вне зависимости от местоположения МКЗ.

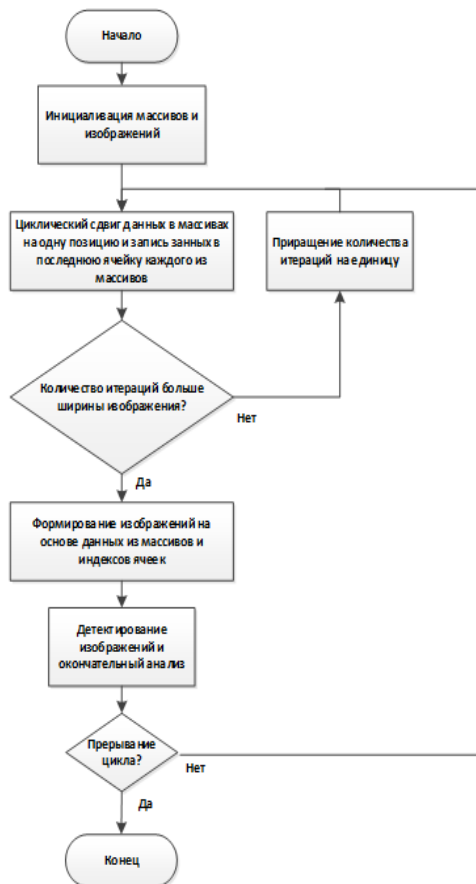


Рисунок 1 – Алгоритм работы программы

После детектирования изображений тремя нейронными сетями производится окончательный анализ.

Если вторая и третья (или четвертая) нейронные сети выдали «1», то алгоритм делает вывод о наличии межвиткового замыкания. С помощью первой нейронной сети выявляется примерное местоположение данной неисправности. В противном случае – межвиткового замыкания не обнаружено.

Испытания проводились в Барановичской дистанции сигнализации и связи и Барановичской дистанции электроснабжения БелЖД, на трансформаторах ПРТ-А и ТС-280Р, которые используются в системах железнодорожной автоматики, телемеханики и связи.

Эксперименты проводились как в режиме холостого хода, так и в режиме работы трансформатора под нагрузкой.

Результаты эксперимента под нагрузкой представлены на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2, при наличии межвиткового замыкания, мощность, сила тока и коэффициент мощности на первичной обмотке выше, чем в нормальном состоянии.

Преимущества данной программы заключаются в том, что нет необходимости отключать и демонтировать трансформатор для проведения испытаний. Так же данная программа позволяет контролировать состояние трансформатора, что позволяет выявить момент возникновения межвиткового короткого замыкания.

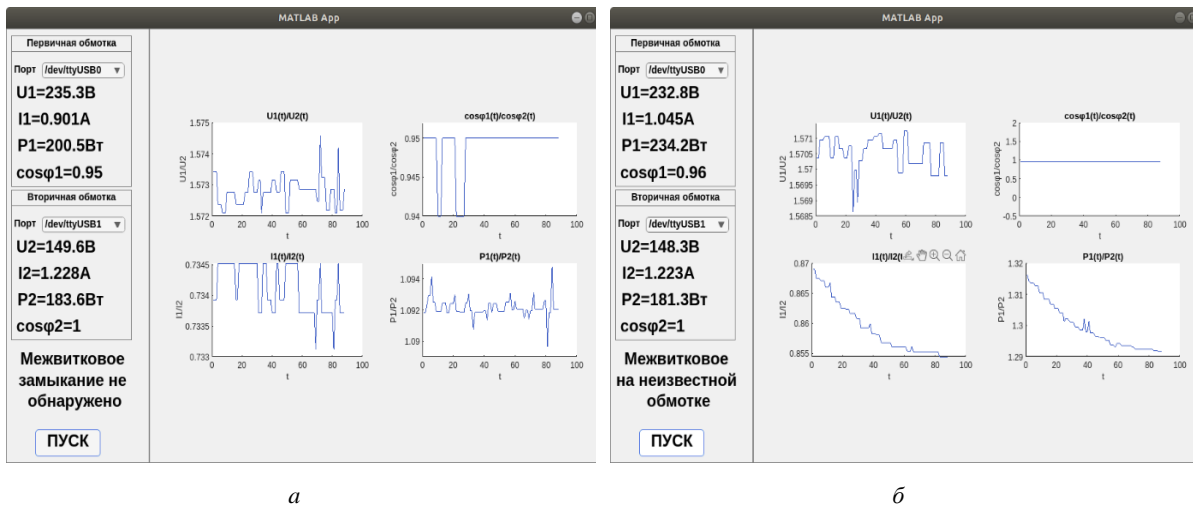


Рисунок 2 – Испытание трансформатора под нагрузкой, в момент его включения при его нормальном состоянии (а) и при межвитковом замыкании (б)

Литература

1. Трансформаторы силовые. Общие технические условия : ГОСТ 11677-85. – 2002. – 39 с.
2. Монастырский, А.Е. Техничко-экономические проблемы диагностики трансформаторного оборудования / А.Е. Монастырский, В.И. Бунин, Я.А. Евдокимов // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. – 2005. – Вып. 28. – С. 367–372.

3. Попов, Г.В. Алгоритм комплексной диагностики масляных трансформаторов / Г.В. Попов, Ю.Ю. Рогожников // Электрические станции. – 2003. – № 8. – С. 54–59.
4. Пехота, А. Н. Диагностика трансформаторов с помощью сверточных нейронных сетей / А.Н. Пехота, В.Н. Галушко, И.Л. Громыко // Энергоэффективность. – 2021. – № 2. – С. 30–36.

УДК 621.382.33

ВВЕДЕНИЕ ПРИМЕСИ-ПРИСАДКИ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫЙ СЛОЙ ПРИ ТВЕРДОФАЗНОМ ЛЕГИРОВАНИИ

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

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Предлагается комбинированный способ легирования эпитаксиального слоя в процессе его выращивания, заключающийся в введении дополнительной примеси. По отношению к свойствам основной примеси дополнительная примесь должна вызывать противоположное по знаку изменение периода решетки матрицы. Использование комбинированного легирования уменьшает напряжение несоответствия периодов решетки кристалла и плотность дислокаций несоответствия.

Ключевые слова: легирование, эпитаксия, примесь, период решетки, дислокация несоответствия.

INTRODUCTION OF IMPURITY INTO THE EPITAXIAL LAYER DURING SOLID-PHASE DOPING

Gusev O.K., Vorobey R.I., Tyavlovsky K.L., Shadurskaya L.I.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The proposed combined method of doping the epitaxial layer in the course of its growing consists of introduction of additional impurity during the process. As to the properties of the main impurities, an additional admixture should cause the opposite sign of change in the lattice period. The use of combined doping reduces tensions caused by non-compliance of the crystal lattice periods and the density of non-compliance dislocations.

Key words: doping, epitaxy, impurity, lattice period, non-compliance dislocation.

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

Одной из основных задач технологии полупроводниковых приборов является легирование эпитаксиального слоя с заданной концентрацией примеси непосредственно во время его выращивания. Используемые методы легирования можно классифицировать по фазовому состоянию исходного примесного соединения: легирование из источников твердой, жидкой, газообразной фаз или молекулярно-лучевая эпитаксия [1; 2].

Если в кремний вводится примесь и атомный радиус этой примеси отличается от радиуса атомов Si, то различие атомных радиусов примеси и кристаллической матрицы приведет к появлению напряжения несоответствия:

$$\Delta\sigma = \frac{E}{1-\gamma} f; \quad f = \frac{\Delta\alpha}{\alpha},$$

где E – модуль упругости, γ – коэффициент Пуассона, f – коэффициент несоответствия периодов решетки кристалла, $\Delta\alpha = (\alpha_d - \alpha_c)$ – разность периодов решетки наращиваемого слоя и подложки [1].

В случае гомоэпитаксии основным источником напряжений несоответствия является различие в природе и концентрации подложки и наращиваемого слоя. При этом упругие постоянные эпитаксиального слоя и подложки остаются практически неизменными. Минимальные напряжения несоответствия достигаются в условиях гомогенности, когда значения несоответствия периодов решетки f не превышают величины $4 \cdot 10^{-4}$.

Одной из основных причин ухудшения параметров полупроводниковых приборов, проявляю-

щихся в снижении надежности, ухудшения шумовых параметров, уменьшения пробивных напряжений являются дислокации несоответствия [3].

Генерация дислокаций может быть снижена при использовании комбинированных процессов легирования одновременно с выращиванием эпитаксиального слоя. При этом наряду с основной легирующей примесью в эпитаксиальный слой вводится дополнительная примесь (примесь-присадка), вызывающая противоположное по знаку изменение периода решетки матрицы (рисунок 1).

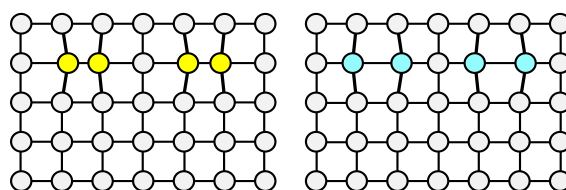


Рисунок 1 – Изменение матрицы кристаллической решетки при введении основной примеси и примеси-присадки

Так, например, если основная легирующая примесь имеет атомный радиус меньше атомного радиуса кремния (фосфор, бор), то примесь-присадка должна иметь атомный радиус больше, чем у кремния.

Условие изопериодного, т. е. не вызывающего изменения периода решетки комбинированного легирования, можно записать в виде

$$f_D N_D = f_C N_C,$$

где f_D и f_C – коэффициенты деформации основной легирующей примеси и компенсирующей примеси-присадки, а N_D , N_C – их концентрации.

При этом, компенсирующая примесь должна удовлетворять следующим основным требованиям: обладать высокой растворимостью, не образовывать химических соединений с матрицей и основной легирующей примесью, быть электрически неактивной или иметь тот же тип проводимости, что и основная легирующая примесь.

Для кремния, например, такими примесями являются изовалентные примеси IV группы: Ge, Sn, С. Германий и олово имеют тетраэдрические ковалентные радиусы больше, чем у кремния, и являются удобными компенсирующими добавками при формировании сильно легированных фосфором и бором эпитаксиальных слоев. Так как растворимость олова в кремнии невелика, то наиболее предпочтительной компенсирующей примесью при комбинированном легировании является германий.

При использовании в качестве основной легирующей примеси сурьмы, имеющей больший чем у кремния атомный радиус, в качестве компенсирующей примеси-присадки целесообразно использовать углерод. Однако его присутствие в эпитаксиальных слоях кремния не всегда желательно [1; 3].

Одним из перспективных методов для введения компенсирующих примесей-присадок в эпитаксиальные слои является метод плазменного легирования [4] из твердофазных источников, в частности, газоразрядное легирование в режиме тлеющего разряда и легирование с использованием лазерной плазмы. Требуемая плотность мощности импульсного лазерного излучения при длине волны 1064 нм составляет величину 10^3 – 10^4 Вт/см². Для улучшения однородности свойств легируемого эпитаксиального слоя может производиться пространственное сканирование мишени лазерным лучом (рисунок 2).

Отметим, что технология газоразрядного легирования из твердофазного источника с лазерной интенсификацией позволяет формировать эпитаксиальные слои с неограниченным перечнем легирующих примесей в широком диапазоне концентраций [5]. При этом контроль концентрации примеси, следовательно и профиль распределения примеси, как основной так и присадки, достигается удобными методами: изменением напряжения и тока газового разряда, интенсивностью лазерного излучения (изменением скважности лазерных импульсов).

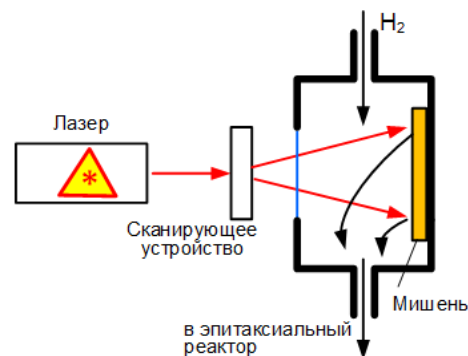


Рисунок 2 – Схема легирования с использованием лазерной плазмы

Использование комбинированного легирования уменьшает напряжение несоответствия периодов решетки кристалла и плотность дислокаций несоответствия в эпитаксиальном слое, что в итоге приводит к улучшению параметров изготавливаемых приборных структур.

Это позволяет использовать предлагаемую технологию для производства широкого спектра приборных структур с применением различных материалов, например, фотоэлектрических преобразователей [6], использующих как кремний, так и некремниевые материалы для формирования базовых приборных структур.

Литература

1. Емельянов, В.А. Эпитаксиальные слои кремния и германия для интегральных микросхем / В.А. Емельянов, А.С. Турцевич, О.Ю. Наливайко. – Минск : Интегралполиграф, 2008. – 288 с.
2. Клюева, В.А. Обзор методов нанесения кремниевых покрытий / В.А. Клюева // Молодой ученый. – 2016. – № 10 (114). – С. 236–246.
3. Методы и механизмы геттерирования кремниевых структур в производстве интегральных микросхем / В.А. Пилипенко [и др.] // Технология и конструирование в производстве интегральных схем. – 2013. – № 2–3. – С. 43–57
4. Интенсификация процессов формирования твердотельных структур концентрированными потоками энергии / под общ. ред. А.П. Достанко и Н.К. Толочко. – Минск : Бестпринт, 2005. – 682 с.
5. Геттерирование эпитаксиальных структур редкоземельными элементами. / Р.И. Воробей [и др.] // Материалы 10-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2017». – Минск : БНТУ, 2017. – С. 73–74.
6. Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors with Intrinsic Photoconductivity / R.I. Vorobey [et al.] // Devices and Method of Measurements. – 2021. – No 2. – P. 108–116.

УДК 539.21, 535.317.61-34, 548.732

ПРЕЛОМЛЯЮЩАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ ОПТИКА ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Дудчик Ю.И.

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

Аннотация. Рассмотрена возможность получения рентгеновских микропучков с использованием короткофокусной многоэлементной преломляющей рентгеновской линзы. Линза с фокусным расстоянием f располагается на расстоянии $a > 2f$ от фокусного пятна рентгеновской трубки и формирует уменьшенное изображение источника излучения. Применение микрофокусных источников рентгеновского излучения позволяет получать рентгеновские пучки микронных размеров, что важно для рентгеновского микроанализа.
Ключевые слова: рентгеновские лучи, многоэлементная преломляющая рентгеновская линза.

REFRACTIVE X-RAY OPTICS FOR LABORATORY SOURCES

Dudchik Y.

A.N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physics Problems BSU
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The possibility of X-ray microbeams formation using a short-focus multi-element refractive X-ray lens is considered. A lens with focal length f is located at a distance $a > 2f$ from the focal spot of the X-ray tube and forms a reduced image of the radiation source. The use of microfocus X-ray sources makes it possible to obtain micron-sized X-ray beams, which is important for X-ray microanalysis.

Key words: X-rays, focus multi-element refractive X-ray lens.

Известно, что эффект преломления рентгеновских лучей в среде мал, и поэтому в течение почти 100 лет считалось, что преломляющая оптика для рентгеновского диапазона спектра не эффективна. Бурное развитие ускорительной техники и появление синхротронных источников рентгеновского излучения, число которых в мире сейчас более 50, стимулировало развитие преломляющей рентгеновской оптики. Поскольку поперечный размер рентгеновского пучка от синхротронного источника составляет около 100 мкм, то перспективными оказались многоэлементные преломляющие рентгеновские линзы, которые были предложены в 1996 г. [1]. Многоэлементная рентгеновская линза состоит из большого числа (30 и более) двояковогнутых соосно расположенных микролинз, выполненных из материала, слабо поглощающего рентгеновское излучение, например, бериллия, углерода, алюминия или полимера. Радиус кривизны отдельной микролинзы составляет 50–200 мкм. Первая преломляющая линза, описанная в [1], была одномерной и выполнена в виде алюминиевой пластины, в которой было просверлено 30 отверстий диаметром 0,6 мм. Диаметры отверстий располагались на одной линии-оптической оси линзы, алюминиевые перешейки между отверстиями представляли собой сферические одномерные двояковогнутые линзы. Фокусное расстояние данной линзы составляло 1,8 м для фотонов с энергией 14 кэВ. В настоящее время многоэлементные преломляющие рентгеновские линзы широко используются для фокусировки рентгеновских лучей с энергией от 5 кэВ до

80 кэВ от синхротронов в пятна микронных и субмикронных размеров. В идеале такие линзы делаются из бериллия, имеют параболическую форму с радиусом кривизны около 50 мкм, число линз от 20 до 100, фокусное расстояние 0,5–1 м. Большое фокусное расстояние линзы не позволяет использовать ее для лабораторных источников излучения в виде рентгеновских трубок. Поэтому разработка короткофокусных рентгеновских линз и их использование для случая лабораторных источников излучения является актуальной проблемой.

В НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ разработаны короткофокусные многоэлементные преломляющие линзы для рентгеновских лучей с фокусным расстоянием 40–100 мм для фотонов с энергией 8 кэВ, и исследованы их рентгенооптические характеристики. Линза состоит из большого числа (100–300) двояковогнутых эпоксидных микролинз, которые сформированы в стеклянном капилляре: радиус кривизны отдельной микролинзы совпадает с радиусом канала капилляра и может быть выбран из интервала от 10 до 400 мкм. Линза тестировалась на различных синхротронах, и было показано их эффективность фокусировать рентгеновское излучение в пятно микронных размеров.

Как и линза для видимого излучения, преломляющая линза для рентгеновских лучей является изображающим устройством и может быть использована в качестве объектива для формирования микропучков. Если источник излучения имеет размер S и расположен на расстоянии a от линзы, то положение изображения источника b

относительно линзы и его размер S_1 находятся из следующих соотношений:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

$$S_1 = S \frac{f}{a - f}. \quad (2)$$

Если $a > 2f$, то линза формирует уменьшенное изображение источника.

Для формирования рентгеновского пучка использовалась многоэлементная преломляющая рентгеновская линза, содержащая 161 двояковогнутую эпоксидную микролинзу с радиусом кривизны 50 мкм каждая, длина линзы – 18 мм. Фокусное расстояние линзы для фотонов с энергией 8 кэВ – 41 мм. В качестве источника излучения использовалась рентгеновская трубка БСВ-17 с медным анодом. Рабочее напряжение на аноде трубки – 32 кВ, анодный ток – 14 мА. Энергия фотонов характеристического излучения меди равна 8 кэВ. Фокусное пятно трубки имеет размер 0,6×0,8 мм². На рисунке 1 показана система для фокусировки рентгеновского пучка и измерения его размеров.

В качестве рентгеновской камеры для регистрации изображения лучей была использована камера фирмы Photonic Science (модель FDI VHR). Камера состоит из блока детектирования, компьютера с платой видео захвата и программным обеспечением для захвата и обработки изображения. Блок детектирования содержит ПЗС – матрицу, к которой присоединена волоконно-оптическая шайба с нанесенным сцинтиллятором. Размер рабочей области рентгеновской камеры составляет 18×12 мм², число пикселей равно 4008×2670. Размер одного пикселя на входе камеры равен 4,5 мкм. Для обработки изображений использовалось программное обеспечение, поставляемое вместе с камерой, а также приложение ImageJ.

Полученные изображения были проанализированы с использованием программы ImageJ: их размеры оказались уменьшенными в 4 и 6 раз относительно размера источника излучения (0,6×0,8 мм²), что соответствует расчетам по формуле линзы (1). Значительное уменьшение размеров пучка в фокусе линзы, вплоть до нескольких микрометров достигается путем использования мощных микрофокусных рентгеновских трубок, которые имеют размер фокусного пятна 20–50 мкм, как это показано в [2].

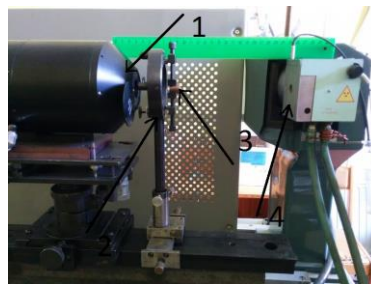


Рисунок 1 – Система для фокусировки рентгеновского пучка: 1 – рентгеновская 2D камера; 2 – гониометр для линзы; 3 – линза в держателе; 4 – рентгеновская трубка

Для получения уменьшенного в N раз ($N = 4$ и $N = 6$) изображения источника рентгеновская линза располагалась на расстояниях $a_1 = 200$ мм и $a_2 = 290$ мм от рентгеновской трубки, расстояния до плоскости изображения линзы, где располагался блок детектирования, b_1 и b_2 рассчитывались по формуле (1) и равнялись: $b_1 = 50$ мм, $b_2 = 48$ мм. Полученные с использованием рентгеновской линзы изображения источника излучения показаны на рисунке 2.

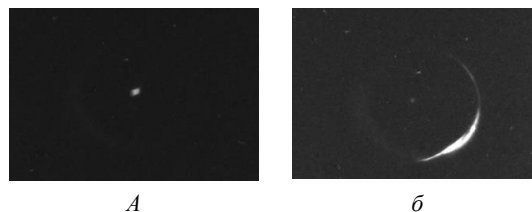


Рисунок 2 – Уменьшенные в N раз изображения источника, полученные с помощью рентгеновской линзы: а) – $a_1 = 200$ мм, $b_1 = 50$ мм, $N = 4$, экспозиция 1,5 с; б) – $a_2 = 290$ мм, $b_2 = 48$ мм, $N = 6$, экспозиция 5 с

Работа частично поддержана Министерством образования Республики Беларусь в рамках задания 3.07 ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», подпрограмма «Техническая диагностика».

Литература

1. A compound refractive lens for focusing high-energy X-rays / A. Snigirev [et al.] // Nature. – 1996. – Vol. 384. – P. 49–51.
2. Формирование рентгеновских микро-пучков с использованием короткофокусной преломляющей рентгеновской линзы и лабораторного источника излучения / Ю.И. Дудчик [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2016. – Т. 10. – С. 1–6.

УДК 621.3.049.77: 681.586

ЦИФРОВОЙ ПОРТАТИВНЫЙ ТЕРМОГИГРОМЕТР С ВНЕШНИМ РАДИОИНТЕРФЕЙСОМ

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

ОАО «МНИПИ»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены результаты разработки цифрового портативного термогигрометра для измерения параметров окружающей среды: температуры, влажности, атмосферного давления. Прибор обеспечивает беспроводную передачу данных с помощью внешнего радиointерфейса.

Ключевые слова: контроль температуры, влажности, атмосферного давления, беспроводная передача данных.

DIGITAL PORTABLE THERMOHYGROMETER WITH EXTERNAL RADIO INTERFACE

Zdorovtsev S.V., Kushnerov D.P., Shevchenko A.V.

OJSC "MNIPI"

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The results of development of the digital portable thermohygrometer for measuring such environmental parameters as temperature, humidity and atmospheric pressure are presented. The device provides wireless data transmission using an external radio interface.

Key words: control of temperature, humidity, atmospheric pressure, wireless data transmission.

Адрес для переписки: Здоровцев С.В., ул. Я. Коласа, 73, г. Минск, 220113, Республика Беларусь

e-mail: zgk@mniipi.by

В настоящее время широкое распространение получили беспроводные регистраторы температуры, влажности, атмосферного давления (термогигрометры). Такие приборы предназначены для контроля и документирования хода технологических процессов на производственных предприятиях и складах, в частности в фармацевтической, медицинской и пищевой промышленности, где требуется контроль товаров, чувствительных к температуре, влажности, атмосферного давления [1–2].

В работе представлены результаты разработки цифрового портативного термогигрометра, предназначенного для измерения параметров окружающей среды: температуры, относительной влажности, атмосферного давления с возможностью определения точки росы и беспроводной передачи данных за счет использования внешнего радиointерфейса.

Структурная схема термогигрометра представлена на рисунке 1.

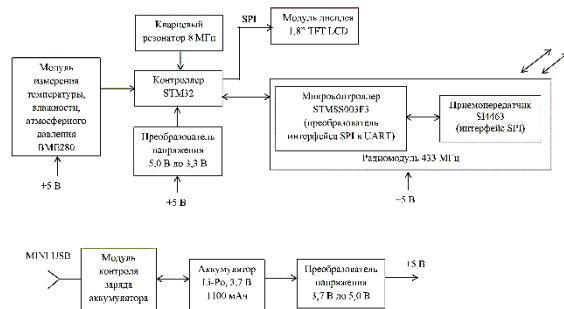


Рисунок 1 – Структурная схема термогигрометра

В качестве датчика температуры, относительной влажности, атмосферного давления использована цифровая микросхема BMP280, обеспечивающая измерение температуры в диапазоне от -40 до $+85$ °С, относительной влажности воздуха в диапазоне от 0 до 100 %, атмосферного давления в диапазоне от 300 до 1100 ГПа. Для отображения значений измерительной информации применен ЖК-дисплей 1,8 Inch ST7735 TFT LCD, работающий под управлением микроконтроллера ST7735S. Для обработки измерительной информации использован микроконтроллер STM32F407VGT6TR с архитектурой Cortex M4, тактовой частотой 168 МГц, объемом флеш-памяти 1 МБ. Обмен данными между термогигрометром и удаленным ПК осуществляется по протоколу беспроводной радиосвязи. С этой целью в термогигрометре применен радиомодуль HC-12 с рабочим диапазоном частот 433,4–473,0 МГц. Электропитание термогигрометра осуществляется с использованием встроенного аккумулятора Li-Po, 3,7В, 1100мАч.

На рисунке 2 показана конструкция разработанного прибора, который состоит из блока регистрации данных и измерительного зонда, подключаемого к прибору напрямую или через удлинительный кабель.

В составе прибора имеются таймер текущего времени и даты, звуковая и визуальная сигнализация, которая включается при отклонении измеренных параметров от заданных значений, а также индикатор разряда батареи.



Рисунок 2 – Конструкция термогигрометра

Прибор обеспечивает возможность запоминания и хранение результатов измерений в ячейке памяти с последующим выводом запомненных данных на ПК с использованием проводного (USB 2,0) или беспроводного (радиоканал) интерфейса. Наличие беспроводного интерфейса дает возможность выполнять дистанционный мониторинг состояния окружающей среды в реальном времени, за счет передачи результатов измерений по беспроводному каналу радиосвязи на удаленный ПК на расстояние до 100 м.

В таблице 1 приведены основные технические параметры модуля.

Таблица 1. Основные параметры модуля параметрического контроля

Параметр	Значение
Диапазон измеряемых температур, °C	от -30 до +40
Точность измерения температуры, °C	±1,0
Диапазон измерения влажности, %	от 10 до 100
Точность измерения влажности, %	±3,0
Диапазон измерения атмосферного давления, гПа	от 300 до 1100
Точность измерения атмосферного давления, гПа	±1,0
Дальность приема-передачи данных, м	100
Весогабариты, мм, кг (без зонда)	170×75×25, 0,25

Текущая измерительная информация, регистрируемая термогигрометром, отображается на встроенном ЖК-дисплее. Кроме того, за счет использования беспроводного интерфейса, полученные данные могут быть переданы на центральный ПК для сбора, обработки и сравнительного анализа измерительной информации.

На рисунке 3 представлено информационное окно ПК при сборе данных с термогигрометра.

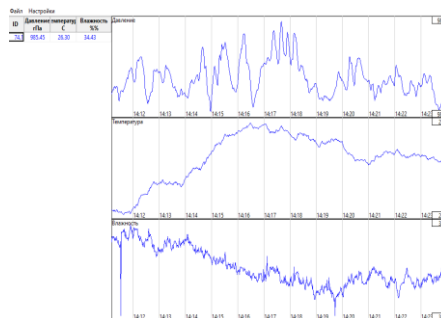


Рисунок 3 – Информационные окна ПК при сборе данных с термогигрометра

В информационном окне ПК отображаются в цифровом виде текущие значения измеряемых параметров и в графической форме временные изменения этих параметров за контрольный период времени. Полученные данные могут сохраняться в архиве для проведения последующего анализа событий.

Разработанный цифровой портативный термогигрометр помимо измерения и отображения измеренных значений температуры, относительной влажности, атмосферного давления на встроенном ЖК-дисплее позволяет производить мониторинг окружающей среды в реальном времени с регистрацией полученных данных на удаленном ПК.

Литература

1. LB-518 – Беспроводной регистратор температуры и влажности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.label.pl/ru/rejestrator-temperatury-wilgotnosci-lb518.html>.
2. Беспроводной мониторинг температурно-влажностного режима [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.eksis.ru/materials/articles/besprovodnoy-monitoring-tempera.

УДК 53.083.7, 537.86

**ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЮ ОБЪЕКТОВ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ
ПРИ ПОМОЩИ ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ
ХАОТИЧЕСКИХ РАДИОИМПУЛЬСОВ**

Ицков В.В., Ефремова Е.В., Кузьмин Л.В.

*ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН»
Москва, Российская Федерация*

Аннотация. Рассматривается задача беспроводного позиционирования объектов на основании измерения мощности СШП хаотических радиопульсов. Описываются радиомодули, позволяющих проводить экспериментальные исследования по измерению расстояния и позиционированию при помощи хаотических радиопульсов. Приводятся результаты беспроводного измерения расстояния между излучателем СШП хаотического сигнала и приемником и позиционирования излучателя на плоскости относительно системы приемников.

Ключевые слова: позиционирование внутри помещений, сверхширокополосные хаотические радиопульсы.

**EXPERIMENT ON INDOOR OBJECTS POSITIONING BY MEASURING THE POWER
OF ULTRAWIDEBAND CHAOTIC RADIO PULSES**

Itskov V.V., Efremova E.V., Kuzmin L.V.

*Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics
Moscow, Russian Federation*

Abstract. The problem of wireless positioning of objects based on measuring the power of UWB chaotic radio pulses is considered. Radio modules that allow experimental studies on distance measurement and positioning using chaotic radio pulses are described. The results of wireless measurement of the distance between the UWB chaotic signal emitter and the receiver and the positioning of the emitter on a plane relative to the receiver system are presented.

Key words: indoor positioning, ultra-wideband chaotic radio pulses.

Адрес для переписки: Ицков В.В., Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, ул. Моховая, 11/7, 129005, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: vadim.itskov@phystech.edu

Точное позиционирование внутри помещений, где недоступны глобальные системы позиционирования (GNSS), играет важную роль в развитии современных систем Интернета Вещей, промышленной автоматизации и предоставлении пользовательских сервисов.

Технические характеристики различных радиотехнологий, таких как WiFi, Bluetooth, UWB, mmWave, их достоинства и недостатки широко обсуждаются в научной периодике [1; 2].

Приведенные в упомянутых работах данные показывают, что характерные точности позиционирования варьируются для: Wi-Fi в пределах ~1–3 м; Bluetooth в пределах ~2–5 м; RFID в пределах ~2 м; ZigBee в пределах ~3–5 м; UWB в пределах ~0,1–0,5 м. На сегодняшний день технологии на основе UWB – единственный класс радиосистем стабильно демонстрирующий в реальном беспроводном канале возможность получения сантиметровой точности, что достигается за счет расширения полосы радиосигнала.

В данной работе для решения задачи измерения расстояния и позиционирования используется радиосистема, в которой применяются приемопередатчики микроволнового диапазона на

основе сверхширокополосных (СШП) хаотических радиопульсов [3].

Приемопередатчики выполнены в виде СШП модемов (рисунок 1). Конструкция СШП модема разрабатывалась для использования в паре с макетными платами разработчиков, имеющими разъем ST Morpho Connector. Модем предназначен для работы в паре с платами разработчиков на базе FPGA или STM32. Модем является RF-front-end устройством, состоящим из передающей и приемной части и включает в себя генератор хаотического сигнала, усилитель мощности, ключ, антенну, малошумящий усилитель, логарифмический детектор, компаратор.

Хаотические сигналы имеют шумоподобный характер колебаний, широкий спектр мощности, узкую автокорреляционную функцию. В средах с многолучевым распространением такие сигналы не подвержены многолучевым замираниям, а накопление сигнала позволяет отстроиться от вариаций мощности сигнала в пределах СШП хаотического радиопульса.

Полоса частот хаотического сигнала определяется свойствами нелинейной динамической системы генератора хаоса, а не длительностью

импульса как в системах на основе ультракоротких импульсов [4]. Это позволяет варьировать длительность хаотического радиоимпульса в широких пределах без изменения спектральных характеристик сигнала. и может меняться в широких пределах. В многолучевых условиях распространения длительность импульса может быть намного больше многолучевого отклика канала, поэтому мощность сигнала в импульсе можно надежно оценить по огибающей радиоимпульса даже при относительно низкой частоте оцифровки сигнала.

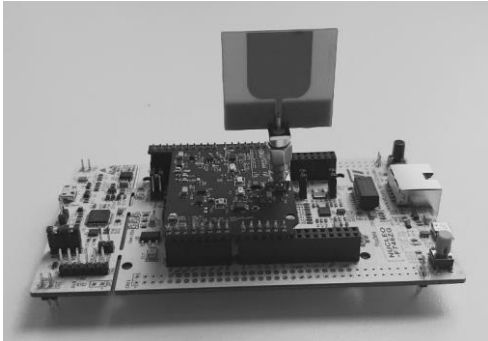


Рисунок 1 – Фото приемника хаотических радиоимпульсов (якоря) на базе платы разработчика STM32 Nucleo-F746ZG

Измерение расстояния между излучателем и приемником происходит по следующей схеме. Передающее устройство (излучатель, координаты которого подлежат определению) формирует и излучает в эфир поток хаотических радиоимпульсов. Приемное устройство, чьи координаты известны, детектирует поступающие радиоимпульсы, и измеряет амплитуду их огибающей A , однозначно связанную с мощностью P . Измерение амплитуды огибающей происходит путем сравнения ее с пороговым значением напряжения в приемнике.

На основании измеренной мощности сигнала P расстояние между излучателем и приемником может быть найдено по известному закону затухания сигнала в беспроводном канале связи:

$$P_d = P_0 + 10n \log(d/d_0), \quad (1)$$

где P_0 – мощность сигнала на референсном расстоянии d_0 между излучателем и приемником сигнала, P_d – мощность сигнала на расстоянии d между приемником и излучателем, а n – показатель затухания в реальном беспроводном канале.

Эксперимент по измерению расстояния между излучателем и приемником (1D) и по определению местоположения (2D) излучателя относительно нескольких приемников проводился в офисном помещении $6 \times 6,5$ м.

Среднеквадратичная ошибка измерения расстояния составила 39 см, среднеквадратичная ошибка измерения координат излучателя – 42 см.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00883, <https://rscf.ru/project/23-29-00883/>.

Литература

1. A Survey of Indoor Location Technologies, Techniques and Applications in Industry / S.J. Hayward [et al.] // Internet of Things. – 2022. – V. 20, 100608.
2. Sesyuk, A. Survey of 3D Indoor Localization Systems and Technologies / A. Sesyuk, S. Ioannou, M. Raspopoulos // Sensors. – 2022. – V. 22, 9380.
3. Qualitative Theory Of Dynamical Systems, Chaos And Contemporary Wireless Communications / Yu.V. Andreyev [et al.] // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2005. – V. 15, № 11. – P. 3639.
4. Zhang, J. Role of pulses in ultra wideband systems / J. Zhang, T.D. Abhayapala, R.A Kennedy // In Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Ultra-Wideband, Zurich, Switzerland, 5–8 September 2005. – 2005. – P. 565–570.

УДК 616.7

УСТРОЙСТВО ДЛЯ СКРИНИНГОВОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СЛИЗИСТОЙ ОБОЛОЧКИ РТА МЕТОДОМ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ СТОМАТОСКОПИИ

Карякин А.А.¹, Карякина О.Е.²

¹ФГБОУ ВО «Северный государственный медицинский университет»
Министерства здравоохранения России

²ФГАОУ ВО Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова
Архангельск, Российская Федерация

Аннотация. В статье представлены результаты проектирования компактного диагностического устройства, реализующего аппаратный метод люминесцентной стоматоскопии для дифференциальной оценки изменений слизистой оболочки рта без использования защитных очков за счет встроенного светофильтра. Конструкция устройства обеспечивает эргономичное закрепление различных моделей мобильных телефонов для фото и видеofиксации результатов исследования, а также соосность центров смотрового окна и центральной точки объектива мобильного телефона. Устройство обладает высоким уровнем ремонтопригодности, поскольку выполено разборным с возможностью замены элементов конструкции, компактные габаритные размеры позволяют расширить условия его применения в стоматологической практике.

Ключевые слова: люминесцентная стоматоскопия, слизистая оболочка рта.

DEVICE FOR THE ORAL MUCOSA SCREENING BY LUMINESCENT STOMATOSCOPY

Karyakin A.A., Karyakina O.E.

¹Northern State Medical University

²Northern (Arctic) Federal University (NArFU)
Arkhangelsk, Russian Federation

Abstract. The article presents results of designing a compact diagnostic device implementing a hardware method of luminescent stomatoscopy for differential assessment of the oral mucosa changes without use of protective glasses due to the built-in light filter. The device design provides ergonomic fastening of various mobile models for photo and video recording of study results, as well as coaxiality of viewing window centers and central point of the mobile phone lens. The device has a high level of maintainability since it is collapsible with the possibility of replacing structural elements. Compact dimensional specifications allow expanding the device use in dental practice.

Key words: luminescent stomatoscopy, the oral mucosa.

Адрес для переписки: Карякин А.А., ул. Терёхина, 6, 209, г. Архангельск, 163020, Российская Федерация
e-mail: biophysica@yandex.ru

На долю злокачественных новообразований слизистой оболочки рта приходится 40 % всей заболеваемости раком головы и шеи, при этом более чем у 60 % пациентов заболевание выявляется на поздних стадиях [1]. Многообразии предраковых заболеваний по клиническому течению и морфологии, отсутствие четких клинических признаков на ранних стадиях малигнизации обуславливает необходимость их эффективной и своевременной диагностики [2]. Для проявления онкологической настороженности врачам-стоматологам требуются неинвазивные бесконтактные методы визуализации патологических изменений слизистой оболочки рта на ранних доклинических стадиях [3]. Приоритетным направлением аппаратной диагностики в стоматологии является прижизненное изучение биологических тканей с помощью метода люминесцентной стоматоскопии, принцип действия которого основан на том, что в неопластических тканях происходят изменения в морфологической структуре, в результате чего меняется их способность поглощать и отражать свет с длиной волны 400–450 нм.

К существенным недостаткам используемых в клинической практике аппаратов можно отнести недостаточную мощность источника излучения, необходимость дополнительного использования врачом специальных очков-светофильтров при анализе диагностической картины, а также отсутствие технической возможности фото- и видеofиксации полученных результатов исследования.

Целью настоящего исследования является создание устройства для аппаратной реализации метода аутофлуоресцентной диагностики слизистой оболочки рта с возможностью повышения эффективности и доступности раннего выявления онкологических заболеваний путем фото- и видеofиксации результатов.

Результаты. Устройство для скринингового исследования слизистой оболочки рта состоит из корпуса и крышки. На боковой поверхности корпуса находится клавиша двухпозиционного выключателя, на стенке корпуса – смотровое отверстие диаметром 32 мм, вокруг которого расположены 16 отверстий, каждое диаметром 3 мм, для направления потока излучения от светодиодов на

слизистую оболочку рта. Оптическое излучение с длиной волны 400 нм и достаточной для визуализации мощностью 1 Вт создается с использованием 16 ультрафиолетовых светодиодов, расположенных в форме кольца вокруг смотрового отверстия с внутренней стороны корпуса. Такое расположение комплекта светодиодов позволяет осуществлять регистрацию флуоресцентных изображений слизистой оболочки рта без образования теней. Обеспечение необходимого уровня напряжения питания и силы тока, проходящего через светодиоды, достигается использованием повышающего преобразователя напряжения. Работа устройства обеспечивается двумя литий-ионными аккумуляторами, расположенными в батарейном отсеке корпуса (рисунок 1).

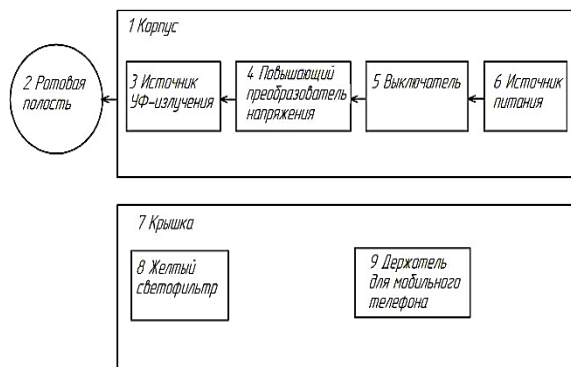


Рисунок 1 – Блок-схема конструкции устройства

В углублении верхней части крышки на уровне смотрового отверстия корпуса размещен желтый светофильтр из органического стекла, который предназначен для визуального анализа явления аутофлуоресценции слизистой оболочки рта без использования защитных очков, а также поглощения отраженных лучей оптического излучения. В нижней части крышки закреплен универсальный П-образный держатель для мобильного телефона, позволяющий осуществлять фото- и видеофиксацию результатов исследования с использованием различных моделей смартфонов и стандартных встроенных программных приложений без приобретения и установки специализированного коммерческого программного обеспечения.

Визуальный анализ явления аутофлуоресценции с использованием устройства может осуществляться как с применением мобильного телефона, так и непосредственно через смотровое отверстие. Оптимальные габаритные размеры устройства (длина 130 мм, ширина 80 мм, высота 40 мм) позволяют рационально разместить все компоненты, а также эргономично и быстро зафиксировать мобильный телефон на устройстве. Устройство имеет разборную конструкцию, что позволит при необходимости осуществить быстрый ремонт и замену комплектующих. Фиксация изображений может производиться одной рукой, что позволяет одновременно регулировать цифровое увеличение камеры смартфона другой рукой [4].

Выводы. Разработанное устройство отличается эргономичностью, компактностью, позволяет проводить скрининговые диагностические исследования слизистой оболочки рта методом люминесцентной стоматоскопии, осуществлять дифференциальную диагностику доброкачественных и злокачественных изменений на ранних стадиях и с большей эффективностью. Разработанное устройство целесообразно использовать в кабинетах стоматологии учреждений здравоохранения квалифицированным медицинским персоналом.

Литература

1. Межевкина, Г.С. Современные методы диагностики предраковых и раковых изменений слизистой оболочки рта / Г.С. Межевкина, Е.А. Глухова // Наука молодых – Eruditio Juvenium. – 2018. – № 4. – С. 600–606.
2. Филимонова, Л.Б., Использование аутофлуоресцентной стоматоскопии как скринингового метода диагностики предраковых состояний и онкологических заболеваний слизистой оболочки рта на стоматологическом приеме / Л.Б. Филимонова, Г.С. Межевкина, Л.О. Маршуба // Наука молодых – Eruditio Juvenium. – 2020. – № 1. – С. 80–85.
3. Применение аутофлуоресцентной стоматоскопии для онкоскрининга заболеваний слизистой оболочки полости рта / Л.Н. Максимовская [и др.] // Стоматология для всех. – 2016. – № 4. – С. 34–37.
4. Оптическое устройство для скринингового исследования слизистой оболочки рта : пат. на полезную модель РФ 219826 / И.П. Попов [и др.]. – Опубл. 09.08.2023.

УДК 628.977

ИНТЕГРАЦИЯ АДАПТИВНОГО ОСВЕЩЕНИЯ В СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗДАНИЯМИ

Клявдо М.А., Савкова Е.Н.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены программные комплексы для управления биодинамическим освещением и создания эффективной визуальной среды.

Ключевые слова: визуальная среда, программный комплекс, управление освещением.

INTEGRATION OF ADAPTIVE LIGHTING INTO MODERN BUILDING MANAGEMENT SYSTEMS

Klyavdo M.A., Saukova Y.N.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Presented software systems for controlling biodynamic lighting.

Keywords: visual environment, software package, lighting control.

Адрес для переписки: Клявдо М.А., ул. Володарского, 58, Островец, 231201, Республика Беларусь;
Савкова Е.Н., пр. Независимости, 65, Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: marinaklyavdo@mail.ru; savkova@bntu.by

Интеграция адаптивного освещения в современные системы управления зданиями осуществляется посредством взаимодействия технического и программного обеспечения. Комплексный подход позволяет не только управлять всеми системами при помощи одного оператора, но и установка систем диагностики и контроля работоспособности всех си-

стем используя как можно меньше унифицированных протоколов передачи данных. Данный подход подходит для зданий большой площади и реализации сложных инженерных проектов, что позволит использовать оборудование с максимальной энергоэффективностью и продлевать срок службы светодиодных источников света.

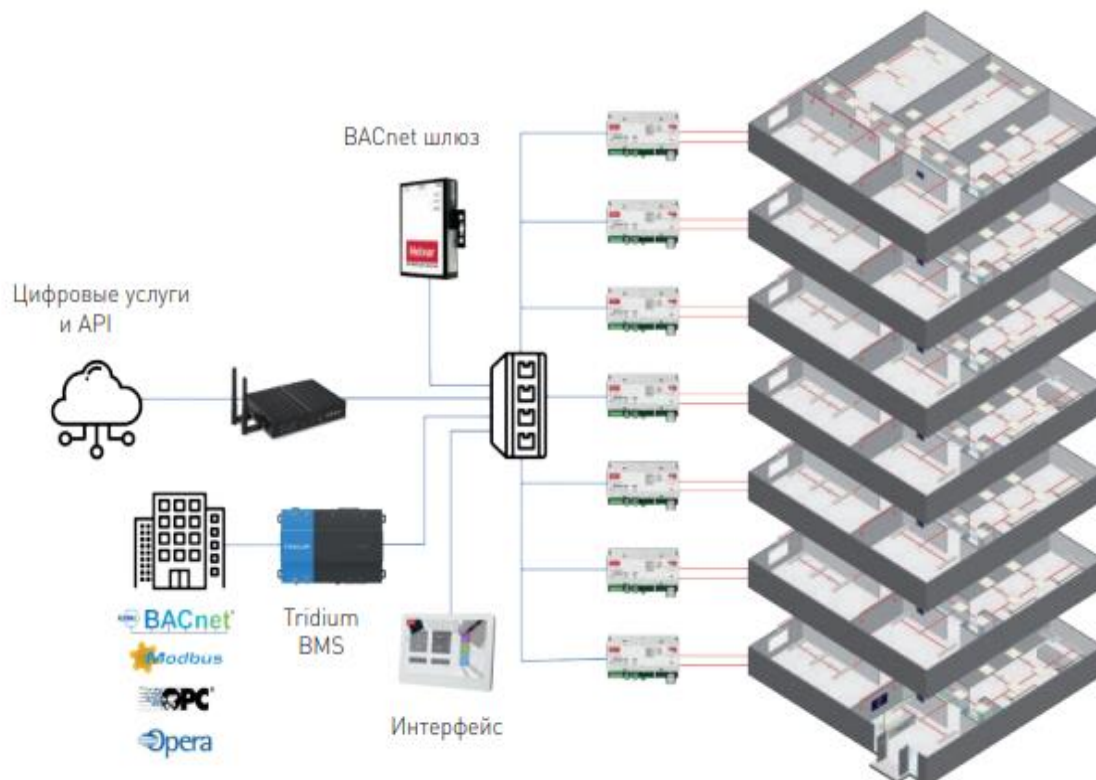


Рисунок 1 – Пример реализации освещения биодинамического освещения при помощи аппаратно-программного комплекса компании Helvar

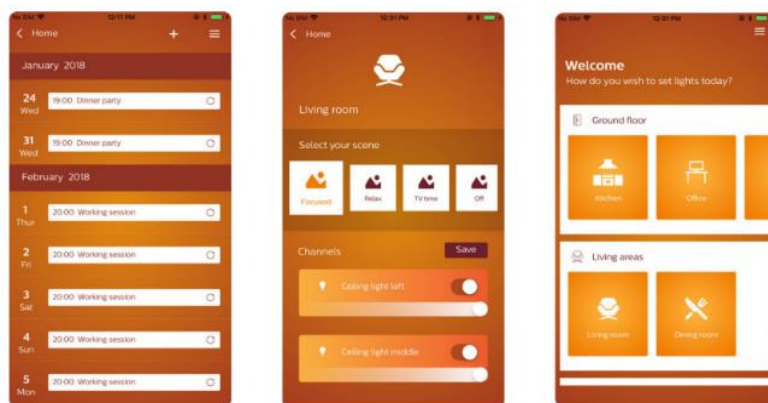


Рисунок 2 – Интерфейс управления биодинамическим освещением Dyalite Intelligent от PHILIPS

Перечислим основные такие комплексы:

1. Vive от американской компании Lutron. Позволяет реализовывать различные комбинации освещения в зависимости от занятости человека в течение дня.

2. ActiveAhead от финской компании Helvar. Более 3000 реализованных проектов объектов торговли, здравоохранения, образования и промышленности. Система автоматически регулирует интенсивность и цветовую температуру света в зависимости от физической активности пользователей.

IMAGINE это система управления освещением, построенная на ведущих протоколах DALI-2 в части управления освещением и Ethernet в части управления роутерами, что позволяет с легкостью добавлять дополнительные роутеры для модернизации сети освещения. Imagine превосходит стандарты отрасли благодаря легкости установки и интеграции. От одного помещения до целого здания – система легко масштабируема даже после установки. Структурная схема управления зданием представлена на рисунке 1.

3. Dyalite Intelligent Lighting Control от PHILIPS также предлагают возможности программного управления биодинамическим освещением. Они позволяют создавать сцены освещения в соответствии с конкретными потребностями пользователей и интегрировать освещение с другими системами управления здания как общественных так и жилых зданий. Интерфейс управления освещением жилого дома показан на рисунке 2.

4. Visual Productions расширяет свое присутствие в архитектурный сегмент освещение, от запуска до ежедневного мониторинга установки. Веб-интерфейс имеет сложный инструмент для обнаружения балластов, назначение адресов, создание сцен, выполнять их или ждать внешних заказов. Благодаря этому также можно расширить систему Dali с интерфейсами Visual Productions.

5. Simplex от российской компании «Полисервис ЦФО». Simplex – это безмерно расширяемая система автоматизации, применяемая как для

жилых, так и промышленных объектов, соответствующая мировым стандартам, с гибкой конфигурацией, способной удовлетворить все ожидания клиентов, поддерживаемая обширной экосистемой, независимо от основного поставщика, так как использует протоколы открытой системы.

Однако, перед выбором программного комплекса, важно провести исследование и анализ потребностей и требований каждой конкретной ситуации. Важно выбрать комплекс, который лучше всего подходит для определенного пространства и потребностей пользователей. Программное биодинамическое освещение является инновационным и перспективным направлением, которое может значительно повысить эффективность и комфорт визуальной среды.

В целом, разработка схемы технического обеспечения биодинамического адаптивного освещения требует инженерных знаний, опыта и тщательного планирования. Однако, с правильным подходом и реализацией, эта технология может значительно улучшить качество освещения и влиять на наше физическое и эмоциональное самочувствие.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования Республики Беларусь (грант договор № 11-48/306 от 15.02.23).

Литература

1. Визуальные постановки ДалиКор: интеллектуальный контроллер освещения для Дали [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.digitalav-magazine.com/ru/2021/06/28/visual-productions-dalicore-controlador-iluminacion-inteligente-dali/.
2. SIMPLEX СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tok-t.ru/download/EAE-Simplex.pdf>.
3. SEESOUND [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://seesound.es/>.
4. LUTRON [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.lutron.com/en-US/pages/default.aspx>.
5. PHILIPS dynolite [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dyalite.com/>.
6. Полисервис ЦФО [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://poliservicecf.ru/simplex/>.

УДК 618

ПРИМЕНЕНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ СИТ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ Коробко Ю.С., Булыга Д.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрены аспекты применения мукомольных сит в сельскохозяйственной промышленности.

Ключевые слова: мукомольные сита, производство, пищевая промышленность.

USE OF SIEVE IN THE AGRICULTURAL INDUSTRY

Korobko Yu.S., Buliga D.V.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Applications of flour-grinding sieves in the agricultural industry are considered.

Key words: flour-grinding sieves, production, food industry.

*Адрес для переписки: Коробко Ю.С., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: korobko.u@bntu.by*

Сита находят самое широкое применение в различных отраслях промышленности: пищевой, фармацевтической, химической, в строительстве и др. Их основное назначение – проверить гранулометрический состав материалов или фильтровать частицы определенного размера. В зависимости от типа производства они подразделяются на мукомольные, строительные контрольные и др. В предлагаемом докладе рассматривается вариант контрольных сит, которые используются в сельском хозяйстве: при производстве круп, молочной продукции, кормовой смеси и т. п.

В сельскохозяйственной деятельности контрольные предназначены для определения размеров зерна, плодов и других продуктов сельского хозяйства. В связи с этим и очень широк их номинал: они отличаются как диапазоном номинала ячеек (от десятков микрон до десятков сантиметров), так и материалом изготовления (могут изготавливаться из холоднокатаных и горячекатаных стальных листов, из листовой нержавеющей стали, оцинкованной стали, а также из алюминиевых сплавов). В основном их используют в процессах очистки, сепарации, шелушения и дробления зерна, в производстве комбикормов. А в пищевой промышленности их используют в процессе очистки размола продуктов, проращивания солода, сепарации молока, при производстве мясо-молочной продукции. После сбора урожая зерновые массы следует очищать, так как оно может содержать мусор, который может случайным образом попасть в зерновую смесь во время ее транспортировки или погрузки. Поэтому такому сложному и важному технологическому процессу, как очистка зерна и семян отводится центральное место в послеуборочной обработке зерновых культур.

Правильный подбор сит определяет качество и производительность очистки, поэтому производство таких продуктов как мука, крупы, комбикорм неизбежно без использования мукомоль-

ных сит. В зависимости от выращивания и других факторов средний размер зерен одной культуры и сорта может быть разным. Для обеспечения наибольшей эффективности рекомендовано подбирать сита в зависимости от имеющейся партии зерна с учетом наличия примесей и ее влажности. Таким образом несмотря на то, что по своей природе сито является довольно примитивным приспособлением, его роль в сельскохозяйственной промышленности очень существенна.

Основным метрологическим требованием применения контрольных сит с точки зрения их метрологической оценки является калибровка – операция установления соотношения между значением величины ячейки сита и соответствующим значением величины, определенной с помощью эталона в целях определения метрологических характеристик этого сита. Калибровка должна производиться в аккредитованной лаборатории или центре. Следует отметить, что в настоящее время вопросы калибровки сит остаются полностью не решенными, поскольку по отношению к ним в основном применялись операции метрологической аттестации. В работе предлагается вариант калибровки контрольных сит, применяемых в сельскохозяйственной деятельности, с использованием в качестве эталона видеоизмерительной машины.

Для реализации поставленной цели была разработана оригинальная методика калибровки контрольных сит, а также разработано рабочее место калибратора, включающее видеоизмерительную машину и имеющееся в лаборатории вспомогательное оборудование, что позволило существенно снизить затраты. Кроме того, в рамках разработанной методики калибровки выявлены основные факторы, влияющие на процесс калибровки и предложена и опробована оригинальная методика оценивания неопределенности измерений при калибровке и предложена схема,

обеспечивающая метрологическую прослеживаемость измерений. В зависимости от результатов калибровки выдается соответствующий документ: при положительных результатах – свидетельство о калибровке, а при отрицательных – протокол калибровки.

Литература

1. Об утверждении Правил осуществления метрологической оценки в виде работ по калибровке средств измерений : Постановление государственного комитета по стандартизации.

2. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Основные методы определения правильности стандартного метода измерений : СТБ ИСО 5725-4.

3. Системы менеджмента. Менеджмент измерений. Анализ измерительных систем : СТБ 2450-16.

4. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры : ГОСТ 8.558.

5. Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Калибровка средств измерений. Организация и порядок проведения : СТБ 8014.

6. Сита контрольные. Технические требования и испытания. Часть 1. Сита контрольные из металлической проволочной сетки : СТБ ISO 3310-1-2019. – 2019.

7. Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками : ГОСТ 6613-89.

8. Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками : ГОСТ 3826-82.

9. Ткани для сит из шелковых и синтетических нитей : ГОСТ 4403-91.

УДК 621.317.799:621.382

ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Лисенков Б.Н.

ОАО «МНИПИ»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Изготовлен макет устройства, который обеспечивает измерение динамических параметров силовых МОП, IGBT, БТ транзисторов и характеристики восстановления силовых диодов.

Ключевые слова: динамические параметры силовых полупроводниковых приборов, метод сдвоенного импульса (DPT), время восстановления (reverse recovery).

MEASUREMENT OF DYNAMIC PARAMETERS OF SEMICONDUCTOR DEVICES

Lisenkov B.N.

JSC "MNIPI"

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A prototype of the device has been made, which provides measurement of the dynamic parameters of power MOS, IGBT, BT transistors and recovery characteristics of power diodes.

Key words: dynamic parameters of power semiconductor devices, double pulse test, reverse recovery time.

Адрес для переписки: «МНИПИ» Лисенков Б.Н., ул. Я. Коласа, 73, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: lisenkovmniipi@tut.by

Применение изделий силовой электроники связано с преобразованием электроэнергии, эффективность которого повышают увеличением частоты переключения, что ставит задачу контроля динамических параметров силовых полупроводниковых приборов (ПП).

Одним из основных требований к системам измерения динамических параметров ПП для контроля продукции на предприятиях электронной промышленности, является автоматизация измерений. Такие системы содержат осциллограф, функциональный генератор, источник напряжения, компьютер, пакет программного обеспечения и модуль (test-fixture), предназначенный для подключения объекта подверженного испытаниям (ОПИ) [1].

Однако стремление к автоматизации связано с большими издержками. Стоимость существующих систем измерения динамических параметров силовых ПП достигает сотен тысяч долларов, что ограничивает их применение в научных лабораториях [1].

Изготовлен макет устройства измерения динамических параметров силовых ПП с ручным управлением, реализующий метод сдвоенного импульса (Double Pulse Test), когда два испытательных импульса разделены паузой. Согласно этому методу энергию, запасенную в накопительном конденсаторе в виде напряжения, преобразуют с помощью дросселя в импульс тока нарастающей амплитуды. При тестировании транзисторов импульс тока прерывают для измерения параметров включения и выключения ОПИ [1; 3].

При измерении времени восстановления обратного сопротивления (reverse recovery) диодов, через ОПИ пропускают постоянный прямой ток, запасенный в дросселе за время 1-го импульса, который затем обрывают путем подачи обратного напряжения 100 В на время 2-го импульса [2]. Постоянный ток протекает через ОПИ в течение паузы между 1-м и 2-м импульсами [4].

Измерение динамических параметров ОПИ выполняют с помощью внешнего осциллографа и

безиндуктивного резистора, преобразующего ток через ОПИ в напряжение [2; 3].

Запуск процесса измерения осуществляют вручную нажатием на кнопку «ИЗМЕРЕНИЕ», либо от внешнего генератора, что позволяет синхронизировать момент измерения с другими устройствами. Импульсы запуска прореживают путем блокировки последующего запуска на 2 сек. При этом скважность импульсов тока через ОПИ, достаточна для рассеяния тепла.

Макет состоит из формирователя импульсов, содержащего блоки: питания (+5 В, ±15 В, ±50 В), синхронизации и высоковольтного напряжения (±150 В) для заряда накопительного конденсатора, а также трех отдельных модулей, каждый из которых обеспечивает подключение определенного типа ОПИ. Модуль подсоединяют к формирователю импульсов многожильным кабелем. Внешний вид формирователя импульсов показан на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид формирователя импульсов со стороны передней панели

Регулировку длительности импульсов и паузы между ними, а также напряжения на ОПИ, осуществляют с помощью переменных резисторов. Плавность регулировки достигают за счет переключения поддиапазонов. Значения параметров испытательных импульсов, установленных вручную, контролируют с помощью внешнего осциллографа [2; 3].

Напряжение заряда накопительного конденсатора обеспечивают с помощью оригинального метода, который позволяет изменять его в широких пределах без применения регулируемого высоковольтного источника [5].

Метод заряда в сочетании с прореживанием импульсов запуска путем их блокировки, положены в основу нового метода измерения динамических параметров транзисторов с предварительной проверкой ОПИ на пробой.

Попытка зарядить накопительный конденсатор при установке в качестве ОПИ уже пробитого транзистора перегружает цепь заряда по току и требует либо увеличения габаритов всего устройства, либо своевременного прекращения заряда.

Согласно новому методу измерения предварительная проверка ОПИ на пробой выполняется путем сравнения продолжительности времени заряда накопительного конденсатора с длительностью порогового интервала, в качестве которого используется интервал блокировки запуска (2 сек). Если время заряда превысит длительность порогового интервала, ток заряда прекращают с одновременной индикацией пробоя ОПИ и

запрещают дальнейшее формирование импульсов запуска до замены ОПИ.

После замены объекта, измерение параметров опять проводят согласно этому методу.

Макет измеряет динамические параметры транзисторов (МОП, IGBT, БТ) и характеристики восстановления диодов согласно таблице 1.

Таблица 1. Измеряемые параметры

Группы	Параметры
Параметры включения	ton, t _d (on), tr
Параметры выключения	toff, t _d (off), tf
Заряд затвора	Qg,
Параметры восстановления	trr, Qrr, Irm

Таблица 2. Характеристики макета

Диапазоны установки	Характеристики
Тока, А	0,5–100
Напряжения, В	±100 и ±20
Длительности 1-го имп., мкс	1–300
Длительности паузы., мкс	1–100
Длительности 2-го имп., мкс	1–40

В модулях подключения все элементы расположены на печатной плате, являющейся панелью модуля. Это позволяет до минимума сократить протяженность измерительной цепи, включающей накопительный конденсатор, дроссель, измерительный безиндуктивный резистор, коаксиальные гнезда для осциллографических пробников и гнезда для ОПИ и обеспечивает формирование и измерение испытательных импульсов в наносекундном диапазоне при величине тока до 100 А.

Проводники, по которым распространяются импульсы тока с фронтами наносекундного диапазона и амплитудой выше 10 А, являются источниками мощных наводок, способных исказить результаты измерения. Степень их влияния зависит от взаимного расположения источников и приемников наводок, поэтому топология печатной платы модуля оказывает существенное влияние на погрешность измерений.

Поверх печатной платы в модулях установлена изоляционная панель, которая не нарушает характеристик измерительной цепи и выполняет функции защиты.

Кроме того, в модулях, предназначенных для тестирования транзисторов, предусмотрена многоступенчатая защита драйвера затвора (базы) ОПИ при его пробое в процессе тестирования. Защита драйвера от пробоя высоким напряжением, возникающим на затворе (базе) пробитого ОПИ, обеспечивается с помощью супрессора, гальванической развязки выходного каскада драйвера и ограничения длительности интервалов включения положительного и отрицательного плеч выходного каскада. В течение упомянутых интервалов включения ток высоковольтного источника, поступает через затвор пробитого ОПИ в цепи (±) питания драйвера и изменяет заряд электролитических конденсаторов в этих цепях и напряжения питания драйвера. Длительность интервалов включения выходного

каскада ограничивают, чтобы эти изменения не превысили допустимых значений.

Характеристики макета помещены в таблице 2.

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. – Дата доступа: 21.10.2020.

2. Приборы полупроводниковые силовые, методы измерений и испытаний : ГОСТ 24461-80. – М. : Изд. стандартов, 1990.

3. Транзисторы силовые биполярные, методы измерений : ГОСТ 27264-87. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1988.

4. Лисенков, Б.Н. Измерение времени восстановления обратного сопротивления силовых диодов / Б.Н. Лисенков, Н.Е. Жданович // Сб. науч. ст. 10-й Междунар. науч. конф. по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного назначения, Минск, 18–19 мая 2023 г. / ГВПК РБ. – Минск : Четыре четверти. – С. 165–168.

5. Лисенков, Б.Н. Метод заряда накопительного конденсатора / Б.Н. Лисенков // Матер. 15-й Междунар. науч.-техн. Конф. «Приборостроение – 2022», Минск, 16–18 нояб. 2022 г. – С. 43–45.

УДК 531.385

ЗАРУБЕЖНЫЕ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

Малютин Д.М., Аносов Д.А.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация

Аннотация. В работе приведен обзор зарубежных гравиметрических комплексов для измерения ускорения силы тяжести.

Ключевые слова: гравиметр, ускорение силы тяжести, гиросtabilизатор.

FOREIGN GRAVIMETRIC COMPLEXES

Malyutin D.M., Anosov D.A.

Tula state university
Tula, Russian Federation

The summary. In work the review foreign gravimetric complexes for measurement of acceleration of a gravity is resulted.

Keywords: gravimeter, a gravity, gyrostabilizer.

Адрес для переписки: Малютин Д.М., пр. Ленина 92, г. Тула, 300002, Российская федерация
e-mail: MalyutinDM@yandex.ru

В настоящее время во многих странах продолжают активные исследования в области гравиметрии с использованием информационно-измерительных систем на базе корректируемых гиросtabilизаторов для измерения аномалий поля силы тяжести в движении с борта подвижного объекта.

В прикладной геофизике по данным гравиметрических измерений изучаются любые геологические объекты, поскольку они обуславливают аномалии на поверхности Земли: тектонические нарушения, складчатые формы, скрытые осадочными породами, сбросы и сдвиги, погребенный рельеф коренных пород, различные формы интрузий, а также линзы, жилы, штоки и связанные с этими структурами месторождения углеводородного и минерального сырья [1].

Представляет интерес достигнутый к настоящему времени технический уровень зарубежной техники в данной области.

Гравиметрический комплекс KSS 31 (ФРГ) обеспечивает точность гравиметрических измерений на профиле при вертикальных ускорениях до 15 Гал не хуже 0,5 мГал, при вертикальных ускорениях от 15 до 80 Гал не хуже 1 мГал, при вертикальных ускорениях от 80 до 200 Гал не хуже

2 мГал. Динамический диапазон измерений 10 Гал. Скорость смещения нуля пункта гравиметра не более 3 мГал/месяц. При обработке информации используется фильтр Бесселя четвертого порядка с постоянной времени от 10,5 до 75 секунд. Общий вид гравиметрического комплекса KSS 31 представлен на рисунок 1.



Рисунок 1 – Гиросtabilизированный гравиметр KSS 31 фирмы BODENSEEWORK

Гравиметрический комплекс BGM-3 (США) обеспечивает точность гравиметрических измерений в море не хуже 0,2 мГал, чувствительность 0,01 мГал, диапазон измерений 978–983 Гал, предсказуемое смещение нуля пункта гравиметра

составляет не более 1,2 мГал/месяц. Температура термостатирования 46 °С. Точность удержания вертикали гиросtabilизированной платформой составляет $\pm 0,1$ мрад. Прокачка гиросtabilизированной платформы по дифференту составляет ± 30 град, а по крену ± 45 град. Регистрация гравиметрической информации осуществляется с дискретностью 1 с. Общий вид гравиметрического комплекса BGM-3 представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Гиросtabilизированный гравиметр BGM-3 фирмы BELL Aerospace

Гиросtabilизированный гравиметр La Coste Romberg имеет чувствительность 0,01 мГал, обеспечивает точность гравиметрических измерений

0,2 мГал при выделении аномалий с периодом 0,5 км. Период собственных колебаний гиросtabilизированной платформы равен 4 мин. Общий вид гиросtabilизированного гравиметра La Coste Romberg представлен на рисунке 3 [2–4].



Рисунок 3 – Гиросtabilизированный гравиметр La Coste Romberg

Несмотря на то, что в настоящее время достигнут высокий уровень технических характеристик гиросtabilизированной гравиметрической аппаратуры, требуется дальнейшее совершенствование аппаратуры с целью увеличения эффективности геологоразведочных работ.

Литература

1. Ривкин, С.С. Гироскопическая стабилизация морских гравиметров / С.С. Ривкин, А.Д. Береза. – М. : Наука, 1985. – 176 с.
2. Малютин, Д.М. Российские и зарубежные бортовые гравиметрические комплексы // Инженерный журнал «Справочник» с Приложением № 10 (127). Приложение № 10 к журналу «Бортовые гироскопические приборы и системы. Научно-технические и образовательные аспекты». – 2007. – С. 13–17.
3. По материалам презентации фирмы Fugro-LCT Inc., Houston, Texas, USA.
4. Проспект фирмы «La Coste & Romberg» «Gravity Meters Inc. AIR-SEA GRAVITYMETER 14th April, 1989.

УДК 519.718.2

ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Мацук А.С., Савкова Е.Н.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Представлены технологии управления рисками для повышения надежности энергетических систем.

Ключевые слова: технологии управления, программный комплекс, рискориентированный подход.

TECHNOLOGIES FOR RISK MANAGEMENT IN ENERGY SYSTEMS

Matsuk A.S., Saukova Y.N.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Risk management technologies to improve the reliability of energy systems are presented.

Keywords: management technologies, software package, risk-oriented approach.

Адрес для переписки: Мацук А.С., ул. Володарского, 58, Островец, 231201, Республика Беларусь;

Савкова Е.Н., пр. Независимости, 65, Минск, 220113, Республика Беларусь

e-mail: vky11a2016@mail.ru; savkova@bntu.by

Технологии управления рисками имеют важное значение для современных организаций, особенно в условиях быстро меняющейся среды. Они помогают оценить и управлять различными видами рисков, связанными с финансами, данными, безопасностью, надежностью и другими аспектами деятельности компании.

Для выявления величины риска существует система методов количественного анализа. К ним относятся:

1) метод аналогий. Наиболее прост в использовании, однако отличается большой приближенностью из-за ряда причин:

– отсутствия полной адекватности условий осуществления даже сходных проектов;

– невозможности учета динамики экономического развития как внутренней, так и внешней среды;

– используется только при наличии полной информации о условиях реализации проекта, что может быть только в стандартных ситуациях;

2) анализ безубыточности - наиболее часто используемый метод определения взаимосвязи между объемами производства, постоянными издержками и маржинальной прибылью;

3) анализ чувствительности – позволяет определить последствия реализации прогнозных характеристик инвестиционного проекта при их возможных колебаниях в положительную или отрицательную сторону;

4) анализ сценариев развития событий основан на проработке трех предположений о возможных сценариях развития событий (базовом, оптимистическом и пессимистическом сценариях);

5) метод Монте-Карло – применяется, когда расчет множества вариантов сочетания переменных величин показателей, используемых для расчета чистого дисконтированного дохода, возможен с применением вычислительной техники;

6) статистические методы. Суть статистических методов оценки риска заключается в определении вероятности возникновения потерь на основе статистических данных предшествующего периода и установлении области (зоны) риска, коэффициента риска и т. д.;

7) теория Байеса является важным инструментом для анализа вероятностей и принятия решений на основе имеющейся информации. Она широко используется в различных областях, включая анализ надежности систем. Теория Байеса, позволяющая учитывать имеющуюся информацию и обновлять вероятностные оценки надежности системы.

Теория Байеса имеет широкое применение в различных областях, включая искусственный интеллект, машинное обучение, статистику, биологию, экономику и другие. Она используется для прогнозирования, классификации, оценки неопределенности, принятия решений и т. д.

Одно из важных применений теории Байеса – это фильтры Байеса, которые используются для обработки данных с учетом некоторых предварительных знаний.

Теория Байеса позволяет обновлять вероятностные оценки на основе новой информации. В контексте анализа надежности систем, это означает уточнение предварительных вероятностей безотказной работы системы при появлении новых данных или результатов тестирования. Используя формулу Байеса, можно пересчитать вероятности на основе имеющихся данных и обновить оценку надежности системы.

Преимущества использования теории Байеса:

1. Учет информации: Теория Байеса позволяет учитывать имеющуюся информацию и обновлять вероятностные оценки надежности системы.

2. Возможность уточнения: Применение теории Байеса позволяет уточнить или скорректировать

вероятностные оценки надежности системы на основе новых данных или результатов тестирования.

3. Принятие обоснованных решений: Использование теории Байеса позволяет принимать обоснованные решения, основанные на обновленных вероятностных оценках надежности системы.

Применение теории Байеса для анализа надежности систем позволяет учитывать имеющуюся информацию и обновлять вероятностные оценки надежности на основе новых данных. Это позволяет более точно определить вероятность безотказной работы системы и принимать обоснованные решения по планированию обслуживания и замене оборудования.

Программные комплексы для анализа надежности, основанные на рискориентированном подходе, представляют собой мощные инструменты для оценки и улучшения надежности энергетических систем.

Программные комплексы, работающие на основе рискориентированного подхода, предоставляют различные инструменты для анализа таких записей. Они позволяют проводить анализ производительности, обнаруживать ошибки и искать узкие места в системе, а также предоставлять дополнительную информацию для тестирования и отладки.

Одним из основных преимуществ рискориентированного подхода является возможность сохранения и анализа большого количества данных. Записи или журналы вместе с соответствующей инфраструктурой позволяют накопить и анализировать информацию о множестве операций, выполняемых системой. Это позволяет выявить повторяющиеся ошибки и проблемы, а также исследовать различные сценарии работы системы.

Важной особенностью программных комплексов на базе рискориентированного подхода является возможность расширения функциональности с помощью добавления новых модулей и инструментов. Они часто предоставляют API или интерфейс, позволяющий разработчикам создавать свои собственные модули для специфического анализа и проверки.

Кроме того, такие комплексы обычно имеют интегрированную систему уведомлений о проблемах и оповещений. Это позволяет оперативно получать информацию о возникнувших ошибках и

проблемах и принимать меры для их устранения или предотвращения.

Однако, необходимо отметить, что рискориентированный подход имеет и свои ограничения. Во-первых, требуется значительное пространство для хранения записей или журналов, особенно в больших и сложных системах. Во-вторых, анализ записей может быть затруднен из-за большого объема данных и необходимости использования специализированных инструментов и алгоритмов.

В заключение, программные комплексы для анализа надежности на основе рискориентированного подхода представляют собой мощный инструмент для оценки и улучшения надежности энергетических систем. Они позволяют анализировать и моделировать систему на основе записей или журналов, что позволяет выявить ошибки, проблемы и узкие места в работе системы. При правильном использовании они способны значительно повысить надежность и качество программного обеспечения.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке представительства АО «Атомтехэнерго» в Республике Беларусь

Литература

1. Technology for Risk Management [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.investopedia.com/terms/t/technologyriskmanagement.asp.
2. Emerging technologies for enterprise risk management [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ch/Documents/risk/ch-risk-emerging-technologies-2016.pdf.
3. The role of technology in risk management [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rmmagazine.com/2017/10/01/the-role-of-technology-in-risk-management/>.
4. Risk management [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mckinsey.com/business-functions/risk/our-insights/technology-in-the-future-of-risk-management>.
5. Формирование структуры байесовской сети процесса тестирования надежности информационных систем / Т.В. Азарнова [и др.] / Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2017. – Т. 13, № 6. – С. 45–51.
6. Строгонов, А. Обзор программных комплексов по расчету надежности сложных технических систем / А. Строгонов, В. Жданов, С. Полеский // Компоненты и технологии. – 2007. – № 5. – С. 183–190.

УДК 003.26.004.7.004.9

ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ УЧЕТА ПОБОЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ

Медведев Н.В.

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

Аннотация. Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС), применяемые для передачи информации критичны с точки зрения несанкционированного доступа и нуждаются в защите. При рассмотрении подхода к инженерной методике учета побочного излучения ВОЛС основным методом является геометрико-оптическое приближение.

Ключевые слова: оптический волновод, побочное излучение, передача информации.

APPROACH TO DEVELOPING AN ENGINEERING TECHNIQUE FOR ACCOUNTING SPURIOUS RADIATION IN AN OPTICAL WAVEGUIDE

Medvedev N.V.

*Bauman Moscow State Technical University
Moscow Russian Federation*

Abstract. Fiber-optic communication lines (FOCL) used for information transmission are critical from the point of view of unauthorized access and need protection. When considering the approach to engineering methods for taking into account spurious radiation from fiber-optic links, the main method is geometric-optical approximation.

Keywords: optical waveguide, spurious radiation, information transmission.

*Адрес для переписки: Медведев Н.В., 2-я Бауманская ул., д. 5, с. 1, г. Москва, 105005, Российская Федерация
e-mail: bauman@bmstu.ru*

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС), применяемые для передачи информации критичны с точки зрения несанкционированного доступа и нуждаются в защите. Для обеспечения надлежащей защиты должна быть выстроена адекватная модель учета побочного излучения из линии, обладающая следующими свойствами:

– модель должна базироваться на волновое уравнение, основанное на положениях скалярной теории оптической дифракции;

– в свою очередь для получения модели, на которой базируется инженерная методика проектирования и анализа ОВ, необходимо сочетание приближения Фраунгофера и геометрикооптического приближения.

Волноводные участки, проложенные между промежуточными станциями, могут располагаться на многокилометровых дистанциях на различной местности. Потери мощности сигнала ВОЛС зависят от имеющейся дистанции. Проектировщики накладывают жесткие ограничения на мощностные потери, которые не должны превышать для ответственных линий 12 децибел на один километр. Кроме того, необходимо понимание, что сигнал не должен значительно искажаться даже на многокилометровых отрезках. Длинные отрезки ВОЛС и неизбежные макроизгибы и микроизгибы кабеля увеличивают возможность несанкционированного съема информации. На протяжении значительных дистанций, через определенные отрезки при строительстве ВОЛС и прокладке кабеля должны размещаться ретрансляционные станции, которые усиливают полезный сигнал или при необходимости регенерируют его. Таким способом поддерживается работоспособность ВОЛС. Применение ретрансляторов может способствовать росту вероятности несанкционированного съема информации. Для того,

чтобы контролировать факты несанкционированного съема на ретрансляторах устанавливается аппаратура интерферометрии. При наличии НСД между ретрансляторами его регистрация весьма затруднительна. К разработке модели физико-энергетических условий возникновения несанкционированной утечки излучения необходим тщательный учет образования этих условий. Как современные исследования, несанкционированная утечка может осуществляться 11 способами. Самым распространенным способом является использование изгиба и микроизгиба ОВ.

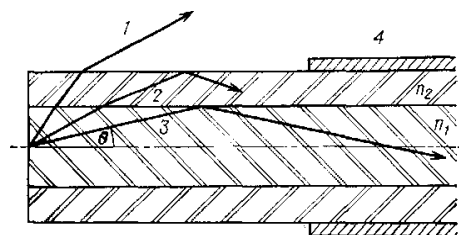
Геометро-оптическая модель ВОЛС для анализа воздействия изгибов и микроизгибов [1].

Рисунок 1 – Двухслойное волокно с меридиональными световыми лучами: 1 – моды излучения; 2 – моды оболочки; 3 – моды сердцевины; 4 – защитный (поглощающий) чехол

При рассмотрении подхода к инженерной методике учета побочного излучения ВОЛС основным методом является геометрико-оптическое приближение. Оптические сигналы, передаваемые на многие километры, нуждаются в ретрансляции для компенсации потерь, возникающих при передаче по ВОЛС. Поэтому волноводы необходимо производить из высококачественных материалов, дающих оптимальные показатели поглощения, рассеяния и дисперсии.

Современные кабели должны предусматривать применение стекол высокой прозрачности и однородности, а там, где это необходимо, должен применяться кварцевые структуры высокой степени очистки. Полученные таким путем оптические волокна обладают необходимым показателем преломления. Они позволяют нести световой поток и поддерживать его направление, применяя свойство полного внутреннего отражения от оплетки кабеля. Однако помехи – предметы, которые могут соприкоснуться с ВОЛС в процессе монтажа или прокладки в шахтах и трубах, нарушают показатели преломления и отражения и могут исказить передачу сигнала по ВОЛС. Современные оптические кабели выполняются в виде прозрачной (как правило, кварцевой) сердцевины, которая окружена стеклянной оболочкой с несколько меньшим значением показателя преломления. Потоки световых лучей, используемые для передачи сигналов, направляются в сердцевине, полностью внутренне отражаясь при приближении к границам волокна. На рисунке 1 представлено модель внутренней части двухслойного волокна. Кроме сердцевины с показателем преломления n_1 и коаксиальной оболочки с показателем n_2 здесь присутствует вторая оболочка-оплетка. Оплетка осуществляет предохранение и защиту волокна и служит поглотителем света, падающего извне ВОЛС. Оплетка обладает правильно выбранными коэффициентами преломления и поглощения. Она может препятствовать перекрестной связи с другими волокнами в связке. Оплетка может также подавлять паразитную интерференцию со

световыми лучами, выходящими из сердцевины волокна без отражения от внешней границы оболочки, они поглощаются оплеткой. На рисунке 1 показаны световые потоки, которые порождаются точечным источником, находящимся на оси волокна. Луч, падающий в сердцевину кабеля, является меридиональным. Такой меридиональный луч, падающий из свободного пространства с показателем преломления $n = 1$ под углом θ_0 к оси, преломляется при вхождении в сердцевину и распространяется в ней под углом θ . Из закона Снеллиуса, учтенного в уравнении Эйконала:

$$\sin\theta_0 = (n_2/n_0)\sin\theta = n_2\sin\theta.$$

До тех пор, пока угол θ остается меньше предельного угла θ_{0c} полного внутреннего отражения от границы сердцевина – оболочка, определяемого соотношением

$$\cos\theta_{0c} = n_2/n_1,$$

сердцевина волокна будет удерживать этот луч. Следовательно, меридиональные лучи, которые падают на переднюю поверхность волоконной сердцевины под углом θ_{0c} и более могут служить основой для применения в технических средствах осуществляющих НСД к ОВ.

Литература

1. Utex [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.utex-telecom.ru>analytics/engineering-fiber-optic.
2. Воздушный кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.consultant.ru/popular/air/.

УДК 621.38

АНАЛИЗ ЭФФЕКТОВ НАКОПЛЕНИЯ ЗАРЯДА В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛЕ В ПРОЦЕССЕ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Микитевич В.А., Борбат М.С., Пантелеев К.В., Воробей Р.И., Жарин А.Л.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе рассмотрены некоторые эффекты накопления заряда в диэлектрическом материале в процессе внешнего воздействия. Приводятся результаты и обсуждение экспериментальных исследований особенностей распределения поверхностного электростатического потенциала образца волокнисто-пористого политетрафторэтилена, полученного методом лазерной абляции.

Ключевые слова: поверхность, поверхностный электростатический заряд, зарядочувствительный зонд.

ANALYSIS OF THE EFFECTS OF CHARGE ACCUMULATION IN DIELECTRIC MATERIAL DURING EXTERNAL INFLUENCE

Mikitsevich V., Borbat M., Pantsialeu K., Vorobey R., Zharin A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The paper reviews some of the effects of charge accumulation in a dielectric material during external influences. The results and discussion of experimental studies of the distribution features of the surface electrostatic potential of a sample of fibrous porous polytetrafluoroethylene obtained by laser ablation are presented.

Key words: surface, surface electrostatic charge, charge-sensitive probe.

*Адрес для переписки: Пантелеев К.В., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: k.pantsialeu@bntu.by*

Введение. В последние два десятилетия наблюдается высокий интерес к изучению электростатики твердых диэлектриков, что подтверждается значительным ростом доли публикаций в

данной области. Получение новых знаний о электрофизических и, в частности, о электростатических свойствах материалов стало возможным благодаря появлению новых экспериментальных

инструментов, таких как сканирующие зондовые микроскопы и сканирующие электроды [1], которые позволяют получать двух- и трехмерные карты распределения потенциала, заряда, емкости, проводимости и др. характеристик поверхности твердых тел. Еще одним фактором, способствующим получению новых и уточнению существующих знаний, стало распространение таких экспериментальных инструментов, как бесконтактные электростатические и зарядочувствительные зонды [2–4], измеряющие электростатический потенциал поверхности.

Новые открытия в электростатике способствуют повышению точности описания различных связанных эффектов. Так, например, в последние годы широко стало приниматься во внимание положение о том, что макроскопические системы в равновесных или квазиравновесных состояниях могут нести избыточный заряд, создавая, конечный электрический потенциал на близком расстоянии от тела [5]. Карты распределения потенциала, полученные на диэлектрических материалах в макро- и микро- масштабе [6], показали, что распределение поверхностного потенциала (заряда) неоднородно, и часто соответствует распределению с фрактальными узорами, что поставило под сомнение одну из ключевых теорий о трибоэлектрическом ряде. Концептуальным изменением является признание роли ионов, как носителей заряда, что позволило рассматривать и описывать «пространственный заряд» с точки зрения ионов и электронов.

Эффекты накопления заряда в твердых диэлектриках. Хорошо известно, что заряды могут образовываться в диэлектриках после механического воздействия, путем имплантации либо путем захвата в рамках механизмов релаксации. Свободная энергия механически напряженных твердых тел выше, чем в релаксированном состоянии, и избыток механической или упругой энергии может привести к структурным дефектам, особенно дислокационного типа [7]. При достаточно больших градиентах химического потенциала, избыточная энергия может спровоцировать образование трибоплазмы. В дальнейшем частицы трибоплазмы развиваются через множество параллельных и последовательных реакций, происходящих на поверхности, а также внутри твердого тела.

Зарядение образцов в электронных микроскопах и фотоэлектронных спектрометрах хорошо знакомо тем, кто использует эти методы. Для предотвращения нежелательных эффектов электризации принимаются специальные меры. Например, образцы для сканирующей электронной микроскопии часто покрывают тонкими пленками из проводящих материалов. Фотоэлектронные спектрометры обычно снабжены устройствами ионного заполнения, чтобы избежать накопления заряда на диэлектрических образцах, которое вносит ошибки в энергетическую шкалу полученных спектров.

Заряженные частицы производят механохимические, радиационные или лучевые реакции. В результате эффекты накопления заряда наблюдаются в большинстве случаев при воздействии проникающего излучения [8]. Например, образование свободных радикалов при разрыве химических связей сопровождается реакциями переноса электрона, приводящими к образованию заряженных частиц [9]. Таким образом, результатом может быть один или несколько различных физических эффектов: микроэлектростатические разряды, триболюминесценция, фоновое и тепловое распространение.

Следует отметить, что данные эффекты характерны не только диэлектрикам. Многие металлы покрыты слоем оксида с низкой собственной проводимостью, т. е. диэлектрическим слоем, изолирующим металлическое тело.

Приборы и методы экспериментальных исследований. В качестве средств измерений использована сканирующая модификация микропроцессорного зарядочувствительного зонда, разработанного в БНТУ [10; 11].

Результаты исследований и их обсуждение. Проведены экспериментальные исследования распределения поверхностного электростатического потенциала образца волокнисто-пористого ПТФЭ, полученного методом лазерной абляции. Как известно волокнисто-пористый ПТФЭ не является электрически активным материалом, однако исследования распределения поверхностного потенциала (рисунок 1) показали, что отдельные локальные области поверхности, несут заряды разных знаков. Вероятно, накопление заряда происходит в процессе получения материала, который изначально закреплен на жесткой подложке. При отрыве слоя вспененного ПТФЭ от подложки происходит его зарядение. Результаты картирования распределения поверхностного потенциала, показывают воспроизводимость результатов измерения в отдельных локальных точках поверхности. Таким образом, приобретенный в процессе отрыва волокна от подложки поверхностный заряд достаточно устойчив, что связано с наличием на поверхности волокон электронных ловушек в виде свободных радикалов, образованных под воздействием лазерного излучения.

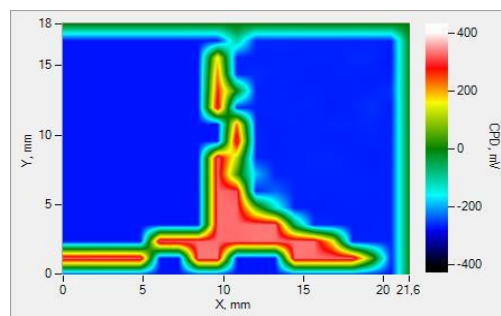


Рисунок 1 – Карта распределения поверхностного электростатического потенциала волокнисто-пористого ПТФЭ

Заключение. Для исследования механизмов заряжения поверхности диэлектрических материалов под действием внешних факторов разработаны требования и методика подготовки образцов, для обеспечения более высокого уровня чистоты экспериментальных исследований, исключая влияние факторов спонтанной электризации. Теоретически обоснованы режимы дополнительного внешнего воздействия лазерным облучением, для отработки методики контроля технологических режимов производства специальных материалов с заданными свойствами.

Литература

1. Measurements of electrostatic potentials and electric fields in some industrial environments / P. Llovera [et al.] // *J. Electrostat.* – 2009. – Vol. 67. – P. 457–461.
2. Пантелеев, К.В. Методы сканирующей зондовой электрометрии в исследовании свойств диэлектрических материалов / К.В. Пантелеев, А.К. Тявловский, А.Л. Жарин // *Перспективные материалы и технологии: монография* / С.М. Алдошин [и др.]; под ред. В.В. Рубаника. – Минск: Изд. центр БГУ, 2021. – С. 125–139.
3. Digital contact potential probe in studying the deformation of dielectric materials. *Informatics* / K. Pantsialeuev [et al.] // *Control, Measurement in Economy and Environmental Protection.* – 2020. – № 10, vol. 4. – P. 57–60.
4. Characterization of the electrophysical properties of silicon-silicon dioxide interface using probe electrometry methods / V.A. Pilipenko [et al.] // *Devices and Methods of Measurements.* – 2017. – V. 8, № 4. – P. 344–356.
5. Patterns of Electrostatic Charge and Discharge in Contact Electrification / S.W. Thomas [et al.] // *Angewandte Chemie.* – 2008. – Vol. 120, iss. 35. – P. 6756–6758.
6. Scanning electric potential microscopy imaging of polymers: electrical charge distribution in dielectrics / A. Galembeck [et al.] // *Polymer.* – 2001. – Vol. 42. – P. 4845–4851.
7. Vasiliu-Oprea, C. Macromolecular mechanochemistry: polymer mechanochemistry / C. Vasiliu-Oprea, F. Dan // *Cambridge International Science.* – 2006. – 390 p.
8. Gross, B. Radiation-induced charge storage and polarization effects, Chapter 4. – In: Sessler GM (ed) *Electrets, topics in applied physics*, 1987. – Berlin: Springer.
9. Burgo, T.A.L. Triboelectricity: macroscopic charge patterns formed by self-arraying ions on polymer surfaces / T.A.L. Burgo, T.R.D. Ducati // *Langmuir*, 2012. – Vol. 28. – P. 7407–7416.
10. Интеллектуальный сенсор для измерительных систем, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик / В.А. Микитевич [и др.] // *Приборы и методы измерений.* – 2023. – Т. 14, № 1. – С. 18–26.
11. Универсальный цифровой зондовый электрометр для контроля полупроводниковых пластин / А.Л. Жарин [и др.] // *Приборы и методы измерений.* – 2023. – Т. 14, № 3. – С. 161–172.

УДК 621.313.333.2

ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ, ПРИВОДЯЩИХ К НЕИСПРОВНОСТЯМ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И СПОСОБЫ ИХ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Мирош Д.В., Громыко И.Л.

*Белорусский государственный университет транспорта
Гомель, Республика Беларусь*

Аннотация. Электропривод с асинхронным двигателем (далее АЭД) обладает простой конструкцией, высокой надежностью и сравнительно небольшой стоимостью. Низковольтные АЭД – наиболее распространенный и широко применяющийся тип электрических машин. В связи с этим вопрос о повышении качества и надежности этих устройств имеет на сегодняшний день важное значение.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, диагностика, неисправности, ремонт, электрические машины.

FUNDAMENTALS OF PROCESSES LEADING TO ASYNCHRONOUS MOTOR MALFUNCTIONS AND METHODS OF THEIR DIAGNOSIS

Mirosh D.V., Gromyko I.L.

*Belarusian State University of Transport
Gomel, Republic of Belarus*

Abstract. An electric drive with an asynchronous motor (hereinafter referred to as AED) has a simple design, high reliability and relatively low cost. Low-voltage AEDs are the most common and widely used type of electric machines. In this regard, the issue of improving the quality and reliability of these devices is of great importance today.

Key words: asynchronous electric motor, diagnostics, malfunctions, repairs, electric machines.

*Адрес для переписки: Мирош Д.В., ул. Кирова, 34, г. Гомель, 246653, Республика Беларусь
e-mail: dimamiroshheat@gmail.com*

Исследование многообразия процессов, приводящих к неисправностям любой электрической машины неизбежно вытекает всего из двух основных: механических и электрических неисправностей. В некоторых случаях также отмечают моральный вид износа, что обусловлено появлением

нового оборудования и заметным падением технико-экономических показателей старого.

Для асинхронных электродвигателей механический износ возникает главным образом в подшипниковых узлах, так как эта часть электродвигателя является связующим звеном между статором и

ротатором, а других трущихся элементов попросту нет. Электрический вид износа предполагает потерю электроизоляционными материалами своих изоляционных свойств, чему подвержены изоляция обмоток и выводов электрической машины. Усилению электрического износа способствуют условия эксплуатации, такие как рабочая температура, наличие химически активных веществ, концентрация пыли и загрязненность среды, а также соответствие условий эксплуатации техническим параметрам, то есть нагрузкам. Помимо указанных выше причин, электрические машины чаще всего повреждаются из-за недопустимо длительной работы без обслуживания и ремонта.

Неисправности и повреждения электрических машин, вызывающие отказ, не всегда удается обнаружить путем внешнего осмотра, так как некоторые из них (в основном электрические) носят скрытый характер и могут быть обнаружены только после соответствующих испытаний и разборки машины, то есть в процессе дефектации [1].

Применительно к асинхронным электродвигателям отказы можно подразделить на электрические и механические. К электрическим относятся те, которые происходят по причине пробоя изоляции на корпус или между фазами, обрыва проводников в обмотке, замыкания между витками обмоток, нарушение или ослабление контактов в клеммной коробке, снижения сопротивления изоляции ниже допустимого вследствие ее старения или увлажнения. К механическим можно отнести разрушения различного рода в подшипниковых узлах, деформация вала ротора, ослабление или обрыв бандажей, снижение качества охлаждения из-за загрязнения охлаждающих каналов или корпуса.

Контролируя признаки, свидетельствующие о той или иной неисправности, можно диагностировать большую часть основных неисправностей. Обычно использование одного параметра способно снабдить диагностический персонал необходимым количеством данных. Это можно наблюдать по вибродиагностированию, которое способствует повышению уровня осведомленности о состоянии важнейших агрегатов и оборудования в промышленности.

В настоящий момент вибродиагностика является одним из главных способов оценки состояния механической части электрической машины. По имеющимся данным более трети от всех неисправностей асинхронных электродвигателей приходится на подшипниковые узлы. Это свидетельствует о прямой необходимости использовать вибродиагностику в качестве основного инструмента оценки состояния и, возможно, для определения срока службы.

Температура является универсальным показателем, который можно использовать лишь в совокупности с другими методами, поскольку полное представление о распределении температур может дать лишь дорогостоящее оборудование. С использованием программных комплексов по созданию полных 3D-моделей электрических машин с заданием различных параметров можно отслеживать распределение тепловых полей на виртуальном образце. Это позволяет с большой точностью определять места максимальных температурных изменений, которые впоследствии могут стать местом установки датчиков температуры, информация с которых способна контролироваться сравнительно недорогими электронными устройствами.

Измерение уровня шума, как и оценка температуры, является скорее вспомогательной составляющей. На данный момент исследований, в которых этот параметр учитывается, практически не встречается. Однако использование совокупности этих данных и отслеживание каждого в режиме реального времени могло бы способствовать выработке универсальной информации. Такой подход является, с одной стороны, комплексным, то есть рассматривает наиболее ценные параметры и в необходимом количестве. С другой стороны, он позволяет унифицировать систему проверки для однотипных электрических машин, что способствует выработке опытной продукции с учетом интересов конечного потребителя.

Литература

1. Антонов, М.В. Эксплуатация и ремонт электрических машин / М.В. Антонов, Н.А. Акимова, Н.Ф. Котеленец. – М. : Высш. шк., 1989. – 192 с.

УДК 614.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ Мисюкевич Н.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Приведены необходимые параметры для формирования непрерывных людских потоков и расчета времени задержки эвакуации в помещении, из которого она начинается.

Ключевые слова: безопасность, задержка, поток, плотность, расчет.

MODELING THE PROCESS OF PEOPLE EVACUATION Misiukevich M.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The necessary parameters are given for the formation of continuous human flows and the calculation of the evacuation delay time in the room from which it begins.

Key words: security, delay, density, flow, calculation.

*Адрес для переписки: Мисюкевич Н.С., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: Misjukevitsch@mail.ru*

Обеспечение пожарной безопасности людей является одной из задач системы пожарной безопасности [1]. Объекты с массовым пребыванием людей в обязательном порядке оборудуются системами оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре [2]. Критические значения опасных факторов пожара при этом определяются по приложению 2 [1].

При эвакуации людей в условиях пожара необходимо избежать возможного превышения значений максимально допустимой плотности на общих путях эвакуации. Это достигается путем зонирования объекта и одновременного оповещения зон для предотвращения недопустимого (по плотности) слияния людских потоков. Так как изначально место возникновения пожара неизвестно, необходимо учитывать все возможные сценарии. То есть пожар может начаться в любой из зон. При этом рассматривается наилучший вариант развития пожара. За место возникновения пожара принимается центр помещения, а форма распространения пожара – круговая. Безопасность людей может быть обеспечена только в том случае, если расчетное время эвакуации не превысит необходимое.

Необходима разработка гибкого алгоритма управления людскими потоками путем одновременного подачи сигнала для различных зон. Расчет движения людей по общим путям эвакуации проводится с учетом возможности формирования непрерывного людского потока с ограничением слияний на общих путях эвакуации. При этом необходимо учитывать как мобильность и возрастные особенности людей, так и их психологические особенности. В частности, целесообразно использовать обычно используемые людьми пути эвакуации. Если пожар происходит в зимнее время, предусмотреть движение людских потоков через гардероб. На время эвакуации увеличить количество обслуживающего персонала.

В технических нормативных правовых актах приведена методика расчета отдельных параметров. Однако, отсутствует алгоритм последовательных действий по ее использованию. В приложении 2 ГОСТ 12.1.004-91 [1] расчет изложен непоследовательно, что затрудняет ее применение для начинающих. Стандартная методика требует дополнения по последовательности проведения расчета и, исходя из практики проведения подобных расчетов, по расчету времени задержки эвакуации из помещений.

В помещениях с массовым пребыванием людей, как правило, возникает задержка эвакуации, так как эвакуационные пути внутри помещения не могут пропустить формирующиеся людские потоки с докритической плотностью. Задержка движения возникает в проходах или дверных проемах.

Эта задержка не может быть определена по формулам приложения 2 [1] в виду их отсутствия.

$$t_3 = \frac{N_3 f}{0,9 q_i \delta_i}, \quad (1)$$

где N_3 – количество людей, не успевающих пройти без задержки, чел; f – площадь горизонтальной проекции человека, m^2 ; q_i – интенсивность движения на участке, м/мин; δ_i – ширина участка пути эвакуации, м.

Значение интенсивности движения следует принимать по нижней строке таблицы 2 [1] соответствующего пути эвакуации.

Безопасность эвакуации из помещения обеспечивается в случае, если суммарное время движения и задержки эвакуации из данного помещения не превысит необходимого.

Есть определенные особенности для описания движения в помещениях с массовым пребыванием людей при наличии однотипных рядов.

Плотность людского потока определяется только для первых участков движения. Если ряды однотипны с одинаковыми проходами, то на

каждом ряду формируются первые участки, а последующие участки формируются в проходах.

Значения интенсивности движения изменяются по нелинейному закону, но в пределах между двумя значениями в таблице 2 приложения 2 [1] изменение может определяться путем линейной интерполяции. На первом участке интенсивность движения определяется исходя из плотности потока, а в дальнейшем по формулам приложения 2 [1]. На первом участке значения скорости движения определяются путем линейной интерполяции в зависимости от значения плотности потока, а на последующих участках в зависимости от значений интенсивности движения для каждого участка, определяется время движения. Время движения в пределах помещения определяется как суммарное время движения по всем участкам от наиболее удаленной точки до выхода из помещения.

Движение возможно пока расчетная интенсивность движения не превысит максимальное значение. Последний участок, на котором интенсивность движения не превышала расчетную величину, принимается как базовый для расчета. Несмотря на то, что движение рассматривалось от наиболее удаленной точки помещения, следующим рассматривается участок от первого ряда до двери. При этом считается, что движется только количество людей, сформировавших поток на базовом участке. Остальные люди будут рассматриваться, как задержавшиеся, по формуле (1).

При наличии однотипных рядов интенсивность движения на участках от ряда к ряду будет возрастать на одну и ту же величину. Эту особенность можно использовать для упрощения расчетов.

Избежать задержек движения на общих путях эвакуации можно применяя задержки опо-

вещения об эвакуации отельных зон и, тем самым, управляя плотностью людского потока за пределами начальных участков движения.

При наличии двух и более эвакуационных выходов с этажа возникает необходимость определения ситуаций блокирования одного из эвакуационных выходов опасными факторами пожара. Очевидно, что это возможно лишь в случае выделения помещений этажа в отдельные зоны. Если эти помещения выходят в разные коридоры (общий коридор разделен перегородками с дверями), зоны управления эвакуацией могут учитывать такое архитектурное решение и ограничиваться помещениями, выходящими в конкретный коридор. Если коридор один, его в любом случае целесообразно выделять в отдельную зону и такое зонирование использовать для сокращения случаев задерживания систем оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре по ложным сигналам о пожаре от систем пожарной сигнализации.

Наиболее сложная расчетная ситуация эвакуации при первоначальном появлении опасных факторов пожара в коридоре. Исходя из критерия безопасности за время, соответствующее расчетному времени эвакуации по коридору, следует обеспечить эвакуацию всех людей из всех помещений, выходящих в данный коридор.

Литература

1. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования: ГОСТ 12.1.004-91. – Введ. 01.07.1992. – Минск : Госстандарт, 2008. – 65 с.
2. Строительные нормы Республики Беларусь. Пожарная автоматика зданий и сооружений : СН 2.02.03-2019. – Введ. 16.08.2020. [Электронный ресурс] / Нац. фонд ТНПА. – Минск, 2021. – Режим доступа: <https://tnpa.by/#!/FileText/623013/490579>.

УДК 681.2.08

ПИТАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ОТ АВТОМОБИЛЬНОЙ БОРТСЕТИ
Мороз А.С., Тьявловский А.К., Тьявловский К.Л., Воробей Р.И., Свистун А.И., Пантелеев К.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрены вопросы стабильности работы и защиты от импульсных и иных помех при питании измерительных устройств от автомобильной бортсети. Предложенные схемотехнические решения обеспечивают защиту приборов при длительной просадке либо отсутствии напряжения питания, противодействуют выбросам напряжения, а также эффективную фильтрацию как внешних, так и создаваемых цепями питания прибора помех.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, бортовая сеть, импульсная помеха, фильтрация.

POWER SUPPLY OF MEASURING DEVICES FROM THE AUTOMOTIVE POWER LINE
Moroz A.S., Tyavlovsky A.K., Tyavlovsky K.L., Vorobey R.I., Svistun A.I., Pantsialeyeu K.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The matters discussed concern the stability of operation and electromagnetic noise protection of measuring devices when connected to the automotive on-board network. The proposed engineering solution allows compensation for prolonged brownout or absence of supply voltage as well as suppressing voltage surges and effective filtering of both external and internal (generated by power supply circuits of the device itself) electromagnetic noise.

Key words: electromagnetic compatibility, on-board electrical network, pulse interference, filtering.

*Адрес для переписки: Мороз А.С., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: artur.moroz.97@mail.ru*

Одной из основных проблем при проектировании измерительных приборов (далее – прибор), применяемых в автомобильной технике, является нестабильность бортовой сети питания. Вопросы электромагнитной совместимости и устойчивости работы приборов в таких условиях регламентируются ГОСТ 33991-2016 «Электромагнитная совместимость, помехи в цепях и требования на излучаемые помехи в цепи питания и в эфир» (ГОСТ Р 41.10-99, Правила ЕЭК ООН N 10).

При проектировании цепей питания прибора в соответствии с требованиями ГОСТ 33991-2016 и ГОСТ Р 41.10-99 возникает необходимость комбинировать различные схемотехнические решения для выполнения каждого из требований стандартов, и стандартные схемотехнические решения во многих случаях оказываются слишком громоздкими либо неэффективными.

В отношении функционирования при воздействии электромагнитных помех для измерительного оборудования, как правило, применяют критерий А (изделие выполняет свои функции в соответствии с назначением во время и после испытаний), что значительно усложняет задачу проектирования подобных устройств.

Соответствие критерию производимых электромагнитных помех при большом импульсном энергопотреблении, вследствие низкого напряжения питания создающим токи более 1 А, требует добавления габаритных фильтров и усложняет

проектирование на устойчивость при воздействиях импульсов напряжения.

Стабильность работы при воздействиях в ГОСТ 33991-2016, разделяется на несколько типов защиты. Основными критериями разделения воздействий являются параметры испытательных импульсов, отдельно заданные для бортовой сети 12 В и для бортовой сети 24 В. В рамках решаемой задачи отдельно требуют рассмотрения два вида импульсов:

1) импульс 4, характеризующий долговременную просадку напряжения. Обеспечение устойчивости к данному типу воздействий является наиболее сложным для критерия функционирования А;

2) импульс 5, моделирующий переходный процесс при сбросе нагрузки, а также размыкании аккумуляторной батареи в то время, когда от генератора еще продолжается подача зарядного тока, а другая нагрузка остается в цепи генератора. Данные импульсы характеризуются высокой энергетикой при амплитуде выброса до +173 В согласно стандарту.

Структурная схема системы питания прибора представлена на рисунке 1. Система строится по линейной последовательной структуре. Схемотехническая реализация данной схемы представлена на рисунке 2. Ее особенностью является то, что каждый блок совмещает функции защиты и фильтрации электромагнитных помех как собственных, так и внешних.

УДК 504.064.38

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО АНЕМОРУМБОМЕТРА НА ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ВЕТРА

Павлюковец Е.Ю., Кузнечик В.О., Чалевич А.Ю.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Проведены исследование влияние конструкции 4-х излучающего ультразвукового анеморумбометра на измеряемое значение скорости ветра. Приведены результаты измерений до и после введенной компенсации.

Ключевые слова: ультразвуковой анеморумбометр, определение скорости ветра.

INFLUENCE OF ULTRASONIC ANEMOMETER DESIGN ON WIND SPEED MEASUREMENT

Pavlyukovets E.Yu., Kuznechik V.O., Chalevich A.Yu.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A study was conducted of the influence of the design of a 4-emitting ultrasonic anemometer on the measured value of wind speed. The measurement results before and after the introduced compensation are presented.

Key words: ultrasonic anemometer, determination of wind speed.

Адрес для переписки: Кузнечик В.О., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: kuznechik@bntu.by

Измерение скорости и направления ветра (газовых потоков) осуществляется с помощью анемометров.

Принцип действия анемометров ультразвукового типа основан на измерении времени распространения ультразвукового импульса между излучателем и приемником в зависимости от скорости и направления ветра (ориентации вектора движения воздуха).

Существуют двухкомпонентные и трехкомпонентные ультразвуковые анемометры. Первые измеряют скорость ветра и направление его движения по частям света, а вторые – все три компонента вектора скорости воздуха.

Целью работы является моделирование влияния конструкции анемометра на его работу и испытание прибора в аэродинамической трубе для обеспечения заданной точности измерений в заданном диапазоне скоростей ветра и направлений воздушных потоков.

Моделирование работы анемометра и симуляция воздушного потока производилось в программной среде SolidWorks.

На рисунке 1 представлена упрощенная модель излучателя анемометра, часть опоры его крепления с симуляцией воздушного потока со скоростью 20 м/с.

Калибровка и испытания датчика ветра проводились в аэродинамической трубе.

Испытания предназначены для определения отклонения скорости, измеряемой анемометром, от известного потока, создаваемого в аэродинамической трубе (рисунок 2).

В трубе предусмотрена установка испытуемого прибора под разными углами к воздушному потоку. Изменение скорости воздушного потока в

аэродинамической трубе осуществляется в диапазоне от $0,01V_{\max}$ до V_{\max} , где V_{\max} – предельная максимальная скорость ветра, которую нужно измерить [1].

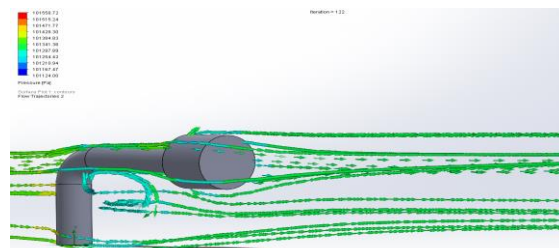


Рисунок 1 – Моделирование воздушного потока в SolidWorks

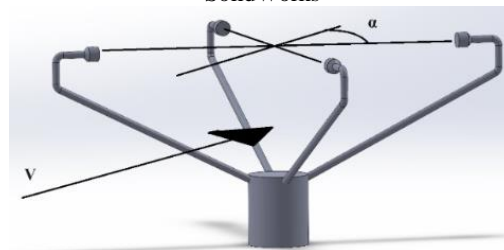


Рисунок 2 – Привязка осей системы координат OXYZ анемометра к направлению вектора скорости V воздушного потока в аэродинамической трубе: V – направление ветра, α – азимут

Калибровка осуществлялась в камере с нулевым потоком воздуха для определения смещения нуля анемометра в рабочем диапазоне температур и выявления погрешностей его юстировки или градуировки.

При практических испытаниях в аэродинамической трубе и без учета поправочных коэффициентов для скорости ветра были получены сле-

дующие результаты (рисунок 3). Экспериментальным путем было выявлена зависимость измеряемой скорости ветра от положения угла прибора относительно воздушного потока. Также заметна зависимость отклонения измеряемой скорости от значения скорости, установленной в поверенной аэродинамической трубе. Так, например на рисунке 2 представлены результаты измерений для скорости воздуха 15 м/с, где максимальное мгновенное измеренное значение скорости ветра составило 15,5 м/с, т. е. относительная погрешность – 3,3 %.

На рисунках 3 и 4 представлены круговые диаграммы, где по кругу отложены значения направления ветра с шагом 45°, по диаметру с шагом в 1,6 м/с указано значение скорости ветра.



Рисунок 3 – Результаты измерений до корректировки полиномиальной зависимости при измерениях скорости воздушного потока 15 м/с

При введении трехмерного полинома с целью уменьшения погрешности измерения были получены результаты, представленные на рисунке 4. Условия измерений полностью идентичны первому эксперименту. При выставленной скорости ветра 15 метров в аэродинамической трубе полу-

чена круговая диаграмма с максимальным значением результата измерений мгновенной скорости 15,2 м/с, что соответствует погрешности 1,3 %.



Рисунок 4 – Результаты измерений с применением корректировочного полинома, измерения производились при таких же условиях скорости

Заключение. При использовании ультразвукового анеморумбометра для определения скорости ветра необходимо вводить полиномиальную зависимость, которая вносит корректировки для измеряемой скорости ветра в зависимости от текущего измеренного значения и направления ветра. В используемой конструкции ультразвукового датчика и с использованием компенсационного полинома удалось увеличить точность измерения в некоторых точках диапазона измерения в 2 раза, по сравнению, с измерениями, проводившимися без учета полиномиальной зависимости.

Литература

1. Корольков, В.А. Метрологическое обеспечение термоанемометров для измерения пульсационных характеристик метеорологических величин / В.А. Корольков, А.Е. Тельминов, А.А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – 28, № 10. – С. 921–928.

УДК 621.38

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТЕНЦИАЛЬНОГО РЕЛЬЕФА В УСЛОВИЯХ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ

Пантелеев К.В.¹, Микитевич В.А.¹, Воробей Р.И.¹, Свистун А.И.¹, Крень А.П.²,
Мацулевич О.В.², Жарин А.Л.¹

¹Белорусский национальный технический университет

²ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе рассмотрены методики экспериментальных исследований изменения распределения работы выхода электрона поверхности (контактной разности потенциалов) металлических материалов различной твердости от степени деформирования. В качестве средств измерений используется сканирующая модификация зарядочувствительного зонда, разработанного в Белорусском национальном техническом университете. Результаты исследований показали, что области с низким значением работы выхода электрона характеризуют области локализации деформации, а критерием степени деформирования является степень изменения относительных значений работы выхода электрона поверхности.

Ключевые слова: работа выхода электрона, контактная разность потенциалов, поверхность, деформация, зарядочувствительный зонд.

ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE FORMATION OF ELECTROPOTENTIAL RELIEF UNDER CONDITIONS OF PLASTIC FLOW OF DEFORMATION

Pantsialeu K.¹, Mikitsevich U., Vorobey R.¹, Svistun A.¹, Kren A.², Matsulevich O.V.², Zharin A.¹

¹Belarusian national technical university

²The Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The paper discusses methods for experimental studies of changes in the distribution of the electron work function on the surface (contact potential difference) of metallic materials of different hardness depending on the degree of deformation. The measuring instruments used are a scanning modification of a charge-sensitive probe developed at the Belarusian Foreign Technical University. The research results show that the region with a low value of the electron work function characterizes the region where deformation is localized, and the criterion for the degree of deformation is the degree of change in the relative results of the electron work function on the surface.

Key words: work function, contact potential difference, surface, deformation, charge-sensitive probe.

Адрес для переписки: Пантелеев К.В., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: k.pantsialeu@bntu.by

В литературных источниках, пластическое течение деформации, как правило, описывается с позиции общих закономерностей. При этом взаимосвязь превращений дислокационной структуры с другими процессами, имеющими место в объеме материала поверхностного слоя при деформации, остается недостаточно раскрытой. Поэтому изучение механизмов течения пластической деформации имеет высокое теоретическое и прикладное значение. В этой связи интерес представляют новые методы и методики исследования материалов в напряженно-деформированном состоянии.

На практике для оценки степени деформирования материала, как правило, используют методы, основанные на оценке изменения геометрических параметров материала вблизи области деформирования. В случае изучения механизмов микронеоднородного деформирования, например, в микрообъемах, для определения 10%-ной деформации поверхностного слоя толщиной до 1 мкм необходимо контролировать изменения линейных размеров отпечатка с точностью менее 0,1 нм [1; 2]. Поэтому, в качестве контролируемого параметра, характеризующего степень деформирования

использовано распределение относительных значений работы выхода электрона (РВЭ) поверхности измеряемого образца [3; 4].

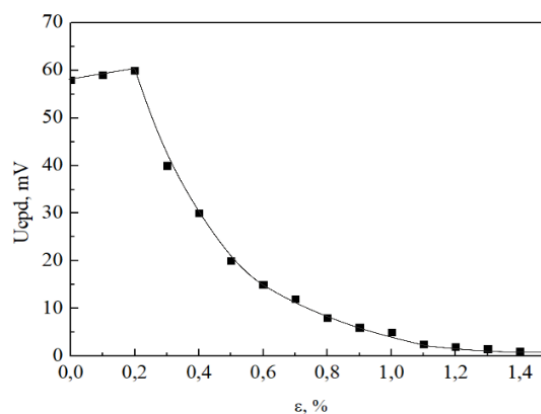


Рисунок 1 – Характерная зависимость контактной разности потенциалов (U_{cpd}) от относительной деформации (ϵ), полученная на образцах из конструкционных сталей

В качестве средств измерений использовалась сканирующая модификация микропроцессорного зарядочувствительного зонда, разработанного в

БНТУ [5; 6]. Суть метода заключается в определении относительных значений РВЭ измеряемой поверхности по контактной разности потенциалов (КРП) относительно эталонной поверхности измерительного зонда [5].

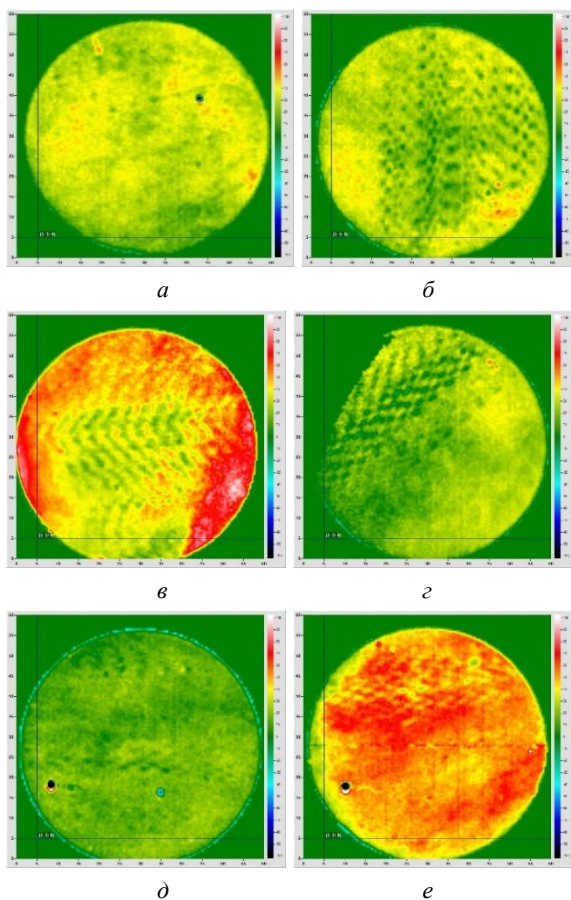


Рисунок 2 – Карта распределения относительных значений работы выхода электрона поверхности образцов из конструкционной стали твердостью 25 HRC (а), 30 HRC (б), 32 HRC (в), 37 HRC (г), 43 HRC (д), 49 HRC (е)

На образцах сталей различной твердости проведены экспериментальные исследования образования и развития локальных деформаций от степени деформирования в области малых (до 4 %) и средних (до 15 %) деформаций (рисунок 1). Деформирование осуществлялось методом индентирования. Экспериментальные исследования

распределения относительных значений РВЭ поверхности образцов конструкционной стали различной твердости приведены на рисунке 2.

Результаты исследований показали, что, в общем случае, области с низким значением РВЭ характеризуют области локализации деформации, а критерием степени деформирования является степень понижения изменения относительных значений РВЭ. В частности, в области действия малых деформаций (до 2–4 %, в зависимости от марки образцов стали) зависимость РВЭ от степени деформирования возрастает, что обусловлено понижением уровня Ферми в следствие дилатации кристаллической структуры. В области средних деформаций (до 15 %), когда преобладает пластическое течение деформации, зависимость РВЭ от степени деформирования убывает.

Литература

1. Жарин, А.Л. Методы зондовой электрометрии для разработки и исследовании свойств перспективных материалов / А.Л. Жарин, К.В. Пантелеев, А.К. Тявловский // Перспективные материалы и технологии: монография: в 2 т.; Витебский гос. тех. ун-т; ред. В.В. Клубович. – Витебск, 2015. – Т. 1. – С. 381–394.
2. Применение метода дифракции рентгеновских лучей для изучения напряженного состояния поверхности металла при статическом и ударном деформировании / А.П. Крень [и др.] // Приборы и методы измерений, 2023. – Т. 14, № 2. – С. 27–37.
3. Исследования локализации пластической деформации в металлах и сплавах / Р.И. Воробей [и др.] // Научно-технический журнал Намаганского инженерно-технологического института. – 2023. – Т. 7, спец. вып. № 2. – С. 479–488.
4. Зарядочувствительный метод исследования деформационных процессов / К.В. Пантелеев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2022. – № 4. – С. 291–301.
5. Пантелеев, К. В. Методы и средства измерения контактной разности потенциалов на основе анализа компенсационной зависимости зонда Кельвина: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.01 / К.В. Пантелеев; БНТУ. – Минск, 2016. – 23 с.
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.

УДК 535.6.08 (004.932)

ЭФФЕКТИВНЫЕ МОДЕЛИ ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ В ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ СРЕДАХ
Савкова Е.Н.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Для реализации метода измерения цвета объекта по его цифровому изображению применяются линейная интерполяция и масштабирование градуировочных характеристик в цветовом пространстве. В этой связи актуальной задачей является систематизация функциональных моделей цветопередачи в программно-аппаратных средах для выявления и компенсации систематических эффектов. В работе описаны четыре группы функциональных моделей цветопередачи и даны рекомендации по их применению для повышения точности и достоверности результатов колориметрических измерений.

Ключевые слова: цифровое изображение, колориметрия, цветопередача, модель.

EFFECTIVE MODELS OF COLOR REPRODUCTION IN SOFTWARE AND HARDWARE ENVIRONMENTS
Saukova Y.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Linear interpolation and scaling of calibration characteristics in colour space are used To implement the method of measuring the colour of an object from its digital image. In this regard, an urgent task is to systematize functional color reproduction models in software and hardware environments to identify and compensate for systematic effects. The paper describes four groups of functional color models and makes recommendations for their use to improve the accuracy and reliability of the results of colorimetric measurements.

Key words: digital image, colorimetry, colour rendition, model.

*Адрес для переписки: Савкова Е.Н., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: savkova@bntu.by*

Цвет цифрового изображения кодируется в шестнадцатирядным числом с плавающей точкой, включающим заголовок профиля, таблицу тэгов и помеченные данные элементов. Процесс цветопередачи в дискретных технических системах описывается моделями:

- 1) параметрическими функциями передающих устройств;
- 2) таблицами цветового поиска;
- 3) рабочими цветовыми пространствами;
- 4) функциями субъективных восприятий.

Простая система CIE (CIEXYZ или CIELAB) не учитывает влияние окружающих стимулов на измеряемый образец или освещение. Пути, предлагаемые в [1]:

- 1) учитывать только предполагаемое состояние хроматической адаптации зрителя, описывать колориметрию фактических оригиналов и их репродукций;
- 2) ориентировать колориметрию изображения на стандартную эталонную среду при определенном условии просмотра.

Цель работы – определить эффективные модели цветопередачи и предложить подходы к их линеаризации.

Референтные параметрические функции передающих устройств ориентированы на зрительные восприятия пользователя, пиковую яркость эталонного монитора и эталонные условия просмотра [1], описываются сверткой стандартных функций типов А, В, М (ICC) или ITU [2]:

- конвертации световой сцены в видеосигнал (OETF);
- видеосигнала в линейную свет-сигнальную передаточную характеристику отображающего устройства (EOTF);
- относительного линейного света сцены в отображаемую сцену (OOTF) [2], приведенных в таблице 1 [3] для систем PQ и Log-Gamma (HLG).

Если $E = \{R_s, G_s, B_s; Y_s \text{ или } I_s\}$ – сигнал, определяемый светом сцены и масштабируемый экспозицией камеры (находится в диапазоне $[0;1]$), E' – нелинейное представление E (цветовое значение $\{R', G', B'\}$ или $\{L', M', S'\}$ в пространстве PQ в диапазоне $[0;1]$), а F_D – яркость отображаемого линейного компонента $\{R_D, G_D, B_D\}$ или Y_D или I_D , в кд/м², то $E' = OETF[E] = EOTF^{-1}[OOTF[E]] = EOTF^{-1}[F_D]$. В таблице Y – нормализованное линейное значение цвета в диапазоне $[0;1]$; m_1, m_2, c_1, c_2, c_3 – константы.

Таблица 1. Стандартные передаточные функции

PQ	Log-Gamma (HLG)
EOTF	
$EOTF^{-1}[F_D] = \left(\frac{c_1 + c_2 Y^{m_2}}{1 + c_3 Y^{m_1}} \right)^{m_2}$ $Y = F_D / 10000$	$F_D = EOTF[\max(0, (1 - \beta)E' + \beta)] =$ $= OOTF[EOTF^{-1}[\max(0, (1 - \beta)E' + \beta)]]$ $\beta = \sqrt[3]{(L_B/L_W)^{1/\gamma}}$
OETF	

Окончание таблицы 1. Стандартные передаточные функции

$F_D = EOTF[E'] = 10000Y$ $Y = \left(\frac{\max[(E'^{1/m_2} - c_1), 0]}{c_2 - c_3 E'^{1/m_2}} \right)^{1/m_1}$	$E' = OETF[E] =$ $= \begin{cases} \sqrt{3E} & 0 \leq E \leq 1/2 \\ a \cdot \ln(12E - b) + c & 1/12 < E \leq 1 \end{cases}$
OOTF	
$F_D = OOTF[E] = G_{1886}[G_{706}[E]]$ $E' = 1,099(59,5208E)^{0,45} - 0,99; (1 > E > 0,0003024);$ $E' = 267,84E; 0,0003024 \geq E \geq 0$	$F_D = OOTF[E] = \alpha Y_S^{Y-1} E$ $R_D = \alpha Y_S^{Y-1} R_S; G_D = \alpha Y_S^{Y-1} G_S; B_D = \alpha Y_S^{Y-1} B_S$ $Y_S = 0,2627R_S + 0,6780G_S + 0,0593B_S$

Таблицы цветового поиска (CLUT) [3] – многомерные матрицы, массивы элементов $p \times q$, где p – количество входных каналов к матрице, а q – количество выходных каналов. Матрица используется для преобразования данных в другое цветовое пространство в соответствии с уравнением:

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \dots & e_{1p} \\ e_{21} & e_{22} & \dots & e_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_{q1} & e_{q2} & \dots & e_{qp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \dots \\ e_q \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Значения CLUT представляют собой массивы 8-разрядных или 16-разрядных неподписанных значений, нормализованные в диапазоне от 0 до 255 или от 0 до 65 535. CLUT организован как i -мерный массив с переменным количеством точек сетки в каждом измерении, где i – количество входных каналов в преобразовании.

Рабочие цветовые пространства, используемые для построения цветовых профилей:

1) определенные ICC, основанные на ISO 13655 и осветителе пространства соединения профиля PCS – PCSXYZ и PCSLAB (значения, рассчитанные по PCSXYZ $X = 0,964 2$; PCSXYZ $Y = 1,0$, PCSXYZ $Z = 0,824 9$ для белого носителя HLG);

2) применяемые в «устаревших устройствах» – YCbCr (ITU-R BT.709-6); PQ ICtSp;

3) применяемые в устройствах с широким динамическим диапазоном HLG – ICtSp (ITU-R BT.2100-2); Y'Cr'Cb' (ITU-R BT.2020-2);

4) квантованное пространство nCIEXYZ с равномерным масштабированием $Y = 1,0$ для принятого белого [3].

В качестве рабочего пространства рекомендовано ICtSp, оттенки которого остаются постоянными при изменении насыщенности или интенсивности.

Модели цветовосприятия цифровых изображений. Стандартная функция отображения оттенков серого определяется математической интерполяцией уровней яркости 1023, полученных из модели Бартена. Средняя яркость следующего более высокого уровня вычисляется путем сложения пиковой модуляции со средней яркостью L_j предыдущего уровня [4]:

$$L_{j+1} = L_j \frac{1+S_j}{1-S_j}, \quad (2)$$

где S_j – пороговая модуляция глаза.

Модель Бартена учитывает нейронный шум (верхний предел контрастной чувствительности на высоких пространственных частотах), боковое торможение, фотонный шум, внешний шум, ограниченную интеграционную способность, оптическую функцию переноса модулей, ориентацию и временную фильтрацию. Комбинация этих эффектов дает уравнение контраста как функцию:

$$S(L) = \frac{q_1 \cdot M_{opt}(L)}{\sqrt{\frac{q_2}{d^2(L)+q_3}}}, \quad (3)$$

u – пространственная частота, d – диаметр зрачка; q_1, q_2, q_3 – константы.

При низких уровнях света контрастная чувствительность пропорциональна квадратному корню светимости согласно закону де Вриса-Роуза. Функция передачи оптической модуляции

$$M_{opt}(u) = e^{-\pi^2 \sigma^2 u^2}, \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + (C_{sph} \cdot d^3)^2}. \quad (5)$$

Стандартная функция отображения в градациях серого получается путем вычисления пороговой модуляции S_j как функции средней светимости решетки, а затем наложения этих значений друг на друга.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Национальной академии наук Беларуси и Министерства Образования Республики Беларусь (код проекта ГБ 21-07/6).

Литература

1. High dynamic range television for production and international programme exchange: REPORT ITU-R BT.2390.
2. Methods for conversion of high dynamic range content to standard dynamic range content and vice-versa: BT.2446-0
3. Image technology colour management – Architecture, profile format, and data structure: Specification ICC.1:2022. – 2022
4. Grayscale Standard Display Function: DICOM PS3.14 2022a. – 2022.

УДК 535.6.08 (004.932)

ТЕХНОЛОГИЯ МАСШТАБИРОВАНИЯ И ЛИНЕАРИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Савкова Е.Н., Прилуцкий И.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Предложена технология масштабирования и линеаризации динамического диапазона цифрового изображения, позволяющая определять цвет объектов по их цифровым изображениям. Технология основана на построении и сопряжении градуировочных зависимостей по аттестованным опорным образцам, регистрируемым одновременно с объектом при различном времени экспозиции. Данная технология позволяет решить проблему ограниченности цветовых охватов передающих технических устройств и выполнять колориметрические измерения в программно-аппаратных средах.

Ключевые слова: цифровое изображение, цвет, градуировочная зависимость, масштабирование.

DYNAMIC RANGE SCALING AND LINEARIZATION TECHNOLOGY OF A DIGITAL IMAGE

Saukova Y., Prylutski I.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The technology of scaling and linearization of the dynamic range of a digital image is proposed, which allows determining the colour of objects from their digital images. The technology is based on the construction and coupling of calibration dependencies based on certified reference samples recorded simultaneously with the object at different exposure times. This technology allows solving the problem of limited colour coverage of transmitting technical devices and performing colorimetric measurements in hardware and software environments.

Key words: digital image, colour, calibration dependence, scaling.

*Адрес для переписки: Савкова Е.Н., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: savkova@bntu.by*

Большинство подходов ITU, ICC к описанию цвета цифрового изображения, стремясь решить проблему ограниченности цветовых охватов передающих устройств, опирается на визуальное восприятие и пиковую яркость монитора, и потому являются нелинейными, что затрудняет выполнение измерений. Предлагаемый экспресс-метод измерения цвета основан на численном моделировании условной многомерной колориметрической шкалы и заключается в создании наборов аттестованных опорных образцов – неточечных излучателей, относящихся к определенному сектору цветовой палитры, образующих при цифровой регистрации с пошагово увеличивающимся временем экспозиции векторы в цветовом пространстве XYZ, берущих начало из нулевой точки отсчета пространства и пересекающих плоскость цветового локуса графика цветностей, формируя на ней геометрическое место точек цветности, позволяющий обеспечить условие единства измерений. Расширение динамического диапазона осуществляется благодаря многократной цифровой регистрации с пошагово увеличивающимся временем экспозиции, построению характеристических и градуировочных зависимостей на основе полученных цифровых изображений с последующим масштабированием.

Чтобы найти точку N_x , находящуюся за пределами максимума необходимо продлить линию OR по касательной. Длина приращения достроенной линии к точке равна:

$$M = B - R. \quad (1)$$

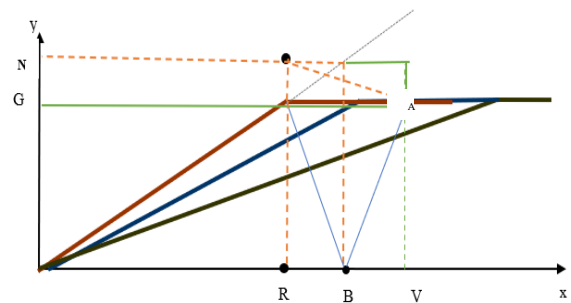


Рисунок 1 – Графическая иллюстрация масштабирования и линеаризации передаточной характеристики

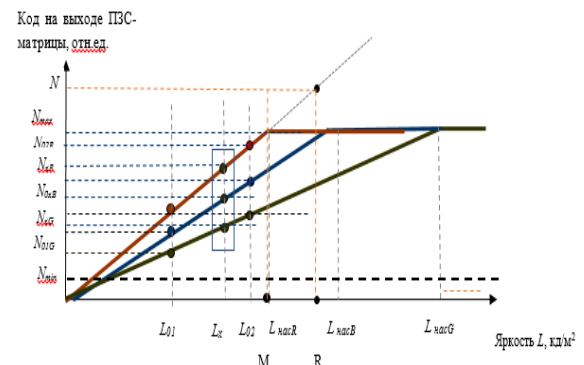


Рисунок 2 – Характеристические зависимости интенсивности цвета изображения от яркости опорных образцов

Таким образом, расстояние до точки N равно Q . Расстояние от точки N до максимума можно найти по теореме Пифагора:

$$G = \sqrt{J^2 + Q^2}. \quad (2)$$

Для нахождения расстояния до точки G , необходимо продлить линию M от N_x на длину X_1 и опустить ее конец к точке G :

$$X_1 = M. \quad (3)$$

Общая длина линии от точки N равна:

$$T = M + X_1. \quad (4)$$

Расстояние от точки N_x до G равно:

$$l_1 = \sqrt{T^2 + y_1^2} \quad (5)$$

Длина $GA = AG$, далее достраивая линию до точки B получаем равнобедренный треугольник.

По теореме Пифагора:

$$G'B = \sqrt{y_2^2 + 2}. \quad (6)$$

Таким образом, $G'B = GB$.

Так, для, если имеются два снимка объекта, выполненные с различными экспозициями $H_1 = E_1 \Delta t_1$ и $H_2 = E_2 \Delta t_2$, то зная связь $H_2 = kH_1$, для расчета неизвестного значения освещенности E_2 (яркости) справедливо выражение:

$$E_2 = k \frac{E_1 \Delta t_1}{\Delta t_2}. \quad (7)$$

Для каждой характеристической зависимости по трем цветовым каналам рассчитываются масштабные коэффициенты преобразования K_{12} , K_{23} :

$$K_{12} = \frac{N_2}{N_1}; K_{12} = \frac{N_3}{N_2}. \quad (8)$$

При этом $N_1 = N_1(L) = K_{12}L$; $N_2 = N_2(L) = K_{23}L$.

Для определения яркости контрольной точки объекта, находящегося в пределах $L_{нас2} \leq L \leq L_{нас3}$, осуществляется сопряжение зависимостей:

$$\begin{cases} N_1 & L < L_{нас} \\ L = N_2 \cdot K_{12} & L_{нас1} < L < L_{нас1} \\ N_3 \cdot K_{12} & L_{нас1} < L < L_{нас1}. \end{cases} \quad (9)$$

Относительные погрешности определяются по формулам:

$$\frac{\Delta L_1}{L_1} = \frac{\Delta L_1}{L_1}, \quad (10)$$

$$\frac{\Delta L_2}{L_2} = \frac{\Delta N_2 \cdot K_{12}}{N_2 \cdot K_{12}}, \quad (11)$$

$$\frac{\Delta L_3}{L_3} = \frac{\Delta N_3 \cdot K_{12} \cdot K_{23}}{N_3 \cdot K_{12} \cdot K_{23}}. \quad (12)$$

Так как величина $\Delta N_i/N_i$ одинакова во всех диапазонах, то и относительная погрешность $\Delta L_i/L_i$ также не изменяется. Для одной и той же точки на объекте: $H_1 = L \Delta t_1$; $H_2 = L O \Delta t_2$. Тогда:

$$E = \frac{H_1}{\Delta t_1} = \frac{H_2}{\Delta t_2}. \quad (13)$$

Далее для каждой последовательной пары источников одной линейки зависимости сопрягаются, например, для одного времени экспозиции. При переходе к изображению со временем экспозиции $t_{m-1} < t_m$ может наблюдаться в свою очередь смещение интенсивности в зеленом канале G в область шумов. На рисунке 1 показаны характеристические зависимости для пары образцов с яркостью L_{01} и L_{02} и интенсивностью ($N_{01R}, N_{01G}, N_{01B}$) и ($N_{02R}, N_{02G}, N_{02B}$) соответственно, динамический диапазон которых ограничивается областями шумов и насыщения (точки $N_{мин}$ и $N_{макс}$, $L_{насR}$, $L_{насG}$, $L_{насB}$). Набор координат цвета (R_x, G_x, B_x) с кодами (N_{xR}, N_{xG}, N_{xB}), соответствующие искомому значению яркости, выделены прямоугольником. При которой координаты цвета исследуемой области цифрового изображения определяют из градуировочных графиков по формулам:

$$R_x = \frac{R_{02} - R_{01}}{N_{0R2} - N_{0R1}} N_{Rx}, \quad (14)$$

$$G_x = \frac{G_{02} - G_{01}}{N_{0G2} - N_{0G1}} N_{Gx}, \quad (15)$$

$$B_x = \frac{B_{02} - B_{01}}{N_{0B2} - N_{0B1}} N_{Bx}, \quad (16)$$

где $R_{01}, R_{02}, G_{01}, G_{02}, B_{01}, B_{02}$ – аттестованные значения координат цвета, «первого» и «второго» опорных образцов в цветовом пространстве RGB; $N_{0R1}, N_{0R2}, N_{0G1}, N_{0G2}, N_{0B1}, N_{0B2}$ – значения усредненной интенсивности цвета соответствующих участков цифрового изображения «первого» и «второго» опорных образцов в рабочем цветовом пространстве, отн. ед.:

$$N = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i, \quad (17)$$

где N_i – интенсивность i -го пикселя цифрового изображения, отн. ед.; N_{Rx}, N_{Gx}, N_{Bx} – значения интенсивности цвета искомой точки в координатах рабочего цветового пространства.

Метод позволяет «отстроиться» от устройства отображения и субъективного фактора, определяя координаты цветности с помощью линейной аппроксимации с заданным уровнем достоверности.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Национальной академии наук Беларуси и Министерства Образования Республики Беларусь (код проекта ГБ 21-07/6).

Литература

1. Серегина, В.И. Начертательная геометрия / Б.Г. Жирных, В.И. Серегин, Ю.Э. Шарикян; под общ. ред. В.И. Серегина. – М. : Изображение прямой линии, 2015. – 27 с.
2. Математическая статистика / Т.И. Чепелёва [и др.] // Точечные оценки неизвестных параметров распределения. – 2022. – С. 31–35.

УДК 621.383

**ПРИБОРНЫЙ РЯД ОПТИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МАГНИТОРЕКОМБИНАЦИОННОГО ЭФФЕКТА**

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

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Предложен приборный ряд оптикомагнитных сенсоров с использованием магниторекомбинационного эффекта. Использование полупроводникового материала с глубокой многозарядной примесью позволяет сформировать датчик с чувствительностью к магнитному полю и оптическому излучению. Комбинированные датчики можно использовать при построении функциональных измерительных преобразователей систем оптической диагностики.

Ключевые слова: оптический сенсор; магниторекомбинационный эффект; полупроводник; многозарядная примесь; управление характеристикой чувствительности.

DEVICE SERIES OF OPTICAL SENSORS USING A MAGNETORECOMBINATION EFFECT

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

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The device series of optomagnetic sensors using magniforecombination effect is developed and proposed. A semiconductor material with deep multi-charged dopant is used to form a sensor with sensitivity to a magnetic field and optical radiation. Combined sensors can be used to build functional measuring converters for optical diagnostic systems.

Key words: optical sensor; magnetorecombination effect; semiconductor; multicharged dopant; management of the sensitivity characteristics.

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

Выполнение задач неразрушающего контроля часто связано с измерением параметров оптического излучения, значения которых определяются многофакторными процессами взаимодействия тестирующего излучения с объектом контроля при одновременном воздействии ряда факторов различной физической природы [1], например, оптического излучения, электрических и магнитных полей.

Одним из подходов решения таких задач является использование фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на основе полупроводников с собственной фотопроводимостью, слабо легированных глубокими примесями, формирующими в запрещенной зоне несколько энергетических уровней с разными зарядовыми состояниями. Особенности физических процессов перезарядки этих уровней [2] обеспечивают на функциональном уровне комплекс новых качественных и количественных характеристик и позволяют создавать фотоприемники для преобразования различных сочетаний входных воздействий различной физической природы на основе ряда простых приборных структур.

Одной из составляющих основы работы мультипараметрических оптических сенсоров предлагается использовать магниторекомбинационный эффект [3]. При этом, противоположные грани сенсорной структуры должны иметь разные

скорости рекомбинации, что традиционно [3] достигается в процессе изготовления и при эксплуатации сенсора невозможно изменение его преобразовательной характеристики. Использование методов изменения скорости рекомбинации в полупроводниковых структурах с многозарядной примесью [2] позволяет во-первых расширить диапазон изменения управляющего параметра (скорость рекомбинации в полупроводниках с многозарядной примесью под действием внешних факторов можно изменять на несколько десятичных порядков), во-вторых делать это оперативно, причем переключение вида преобразовательной характеристики происходит за время, определяемое постоянной времени жизни носителей заряда и может составлять от единиц наносекунд до десятков микросекунд.

Основой приборного ряда оптических сенсоров с использованием магниторекомбинационного эффекта являются три структуры: резистивная и структуры биполярного и полевого транзисторов. Причем оптическое излучение вводится только в область одной из боковых граней сенсорной структуры (на рисунках выделено штриховкой). Контакты сенсорной структуры наносятся на грани 1–2 или 3–4. Освещение одной из одинаковых граней структуры 1 или 2 (рисунок 1) приведет к изменению вблизи нее скорости рекомбинации и появлению чувствительности к магнитному полю.

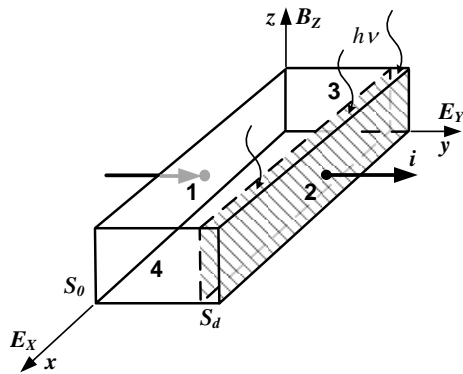


Рисунок 1 – Резистивный оптический сенсор с использованием гальваномагниторекомбинационного эффекта в полупроводнике с разными скоростями рекомбинации на боковых гранях 1 и 2

Относительное изменение проводимости вдоль оси x вызвано изменением средней по сечению структуры концентрации носителей заряда пропорционально величине индукции магнитного поля B в такой структуре чувствительность к магнитному полю появляется только при освещении одной из боковых граней, и, в свою очередь, изменение магнитного поля приводит к изменению чувствительности к оптическому излучению.

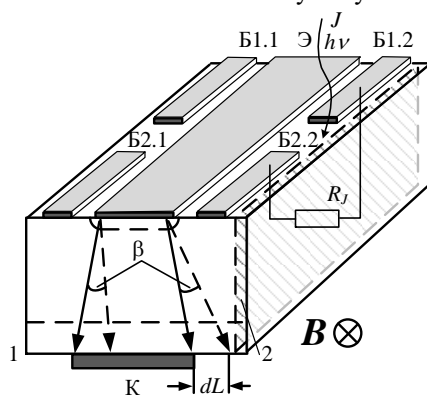


Рисунок 2 – Оптико-магнитный сенсор на основе биполярного транзистора

Структура оптического сенсора с управлением магнитным полем на основе биполярного транзистора приведена на рисунке 2.

Разделенные выводы области базы позволяют использовать ее как фоторезистор для независимого, от влияния магнитного поля, измерения интенсивности оптического излучения.

Управление чувствительностью к магнитному полю под действием оптического излучения происходит благодаря использованию в качестве

основы сенсора полупроводника с глубокой многозарядной примесью [2], например $\text{Si}(\text{Ni})$, $\text{Si}(\text{Fe})$ и др.

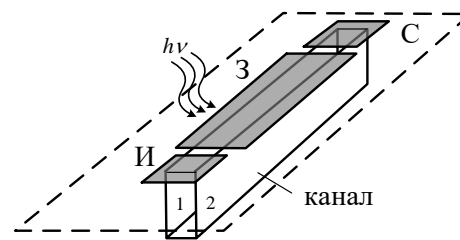


Рисунок 3 – Оптико-магнитный сенсор на основе полевого транзистора

Изменение типов базового материала и примеси, а также ее концентрации позволяет в широком диапазоне изменять диапазон спектральной характеристики чувствительности (от 1 до 12 мкм) и диапазон управления преобразовательными характеристиками чувствительности к оптическому излучению и магнитному полю. Следует отметить, что для управления характеристиками чувствительности и к оптическому излучению, и к магнитному полю, может использоваться дополнительное оптическое излучение. При производстве сенсорных структур может использоваться как технология их изготовления на основе монокристаллических материалов, так и с применением некремниевых технологий и технологий применения разнородных материалов на диэлектрической подложке [4], например, $\text{Si}(\text{Ni}) + \text{GaAlAsP}$ на сапфире.

Предлагаемые сенсоры, в которых чувствительность к одному параметру изменяется при воздействии фактора другой физической природы, реализуют функцию умножения интенсивности оптического излучения на напряженность магнитного поля. При освещении обеих граней сенсора реализуется функция компаратора оптического излучения.

Литература

1. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными состояниями / 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. – No 2. – P. 108–116.
3. Информационно-измерительная техника и электроника. Преобразователи неэлектрических величин / под общ. ред. О.А. Агеева, В.В. Петрова. – 2-е изд. – М. : Юрайт, 2018. – 158 с.
4. Масол, И.В. Информационные нанотехнологии / И.В. Масол, В.И. Осинский, О.Т. Сергеев. – Киев : Макрос, 2011. – 560 с.

УДК 681.3

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ХОЛОДИЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

Сычик В.А., Шумило В.С., Уласюк Н.Н.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Термоэлектрический холодильный элемент содержит p - и n -полупроводниковые области с омическими контактами, n - p гетероперехода, толщина контактирующей с гетеропереходом n -области составляет $(0,5-0,8)L$, толщина контактирующей с гетеропереходом p -области составляет $(2-5)L$, где L – диффузионная длина пробега электронов, причем n -полупроводник является узко зонным, а p -полупроводник – широко зонным.

Ключевые слова: полупроводник, гетеропереход, омический контакт, подложка, диффузионная длина, энергия электронов, запрещенная зона, обедненная область.

THERMOELECTRIC REFRIGERATION ELEMENT

Sychyk V.A., Sumilo V.C., Ulasiuk M.M.

Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The thermoelectric refrigeration element contains p - and n -semiconductor regions with ohmic contacts, an n - p heterojunction, the thickness of the n -region in contact with the heterojunction is $(0.5-0.8)L$, the thickness of the p -region in contact with the heterojunction is $(2-5)L$, where L is the diffusion travel length of electrons, and the n -semiconductor is narrow-gap, and the p -semiconductor is wide-gap.

Keywords: semiconductor, heterojunction, ohmic contact, substrate, diffusion length, electron energy, band gap, depletion region.

Адрес для переписки: Сычик В.А., пр-т Рокоссовского, 49–18, г. Минск, 220095, Республика Беларусь

e-mail: bntu@bntu.by

Термоэлектрический термохолодильный элемент представляет полупроводниковый термопреобразователь электрической энергии в низкотемпературный интервал, функционирует на эффекте Пельтье и может эффективно использоваться в холодильных аппаратах. Нами сформирована структура полупроводникового термоэлектрического холодильного элемента, первичным преобразователем которого является p - n гетеро-переход [1; 2].

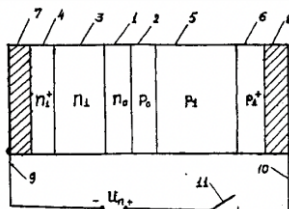


Рисунок 1 – Структурная схема термоэлектрического холодильного элемента

Конструктивно термоэлектрический холодильный элемент (ТХЭ) состоит из гетероперехода, включающего обедненную n_0 -область 1 из узкозонного полупроводника и обедненную p_0 -область 2 – из широкозонного полупроводника. Обедненная n_0 -область контактирует с узкозонной n_1 -полупроводниковой областью 3 и сильнолегированным n_1^+ слоем 4, а обедненная p_0 область контактирует с широкозонной p_1 полупроводниковой областью 5 и сильнолегированным p_1^+ слоем 6. На сильнолегированных n_1^+ и p_1^+ слоях размещены омические контакты 7 и 8, которые жестко связаны с внешними выводами 9 и 10. n_1 -область ТХЭ изготавливается из узкозонного полупроводника, обладающего вы-

сокой подвижностью носителей, большим временем их жизни и возможностью методом легирования создавать в его объеме сильнолегированные слои, например из германия. Ширина n_1 -области ТХЭ определяется минимумом потерь электронов, инжектируемых источникам питания U_n , подключаемым коммутатором 11, и, как показали результаты эксперимента, составляет $(0,5-0,8)Ld$, где Ld – диффузионная длина пробега электронов в n_1 - или p_1 -области. P_1 область ТХЭ формируется из широкозонного полупроводника с большим временем жизни носителей и также возможностью создавать методом легирования в его объеме сильнолегированные слои, например из арсенида галлия. Ширина p_1 области определяется полным поглощением в ней тепловой энергии электронов, экстрагируемых из n_1 - в p_1 -область и составляет $(2-5)Ld$.

Сильнолегированный n_1^+ слой представляет часть n_1 -области, который сформирован путем введения высокой концентрации донорной примеси $N_d \cong 10^{20} \text{ см}^{-3}$, обладает малым сопротивлением и обеспечивает омический контакт с металлическим слоем.

Сильнолегированный p_1^+ -слой представляет часть p_1 -области и также сформирован методом диффузии или ионной имплантации при введении высокой концентрации акцепторной примеси $N_a \cong 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Он обладает высокой проводимостью и обеспечивает омический контакт с металлическим слоем. Для контакта невырожденных полупроводников количество поглощаемого тепла в p_1 -области от инжекции в нее электронов из n_1^+ -области зависит от соотношения концентрации

электронов в этих областях (n_{n1}/n_{p1}), поэтому узкозонная n_1 области легирована примесью с концентрацией примеси $N_{d1} \cong 10^{18}-10^{19} \text{ см}^{-3}$, а широкозонная p_1 область легирована акцепторной примесью $Na_1 \cong 10^{16}-10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Поскольку в рабочем режиме примесь узкозонного полупроводника, то есть n_1 -области полностью ионизирована, то концентрация электронов в n_1 -области $n_{n1} \cong 10^{18}-10^{19} \text{ см}^{-3}$, а концентрация электронов в широкозонной полупроводниковой p_1 -области будет меньше концентрации носителей для собственного полупроводника, то есть $n_{p1} \cong 10^8 \text{ см}^{-3}$, то соотношение $n_{n1}/n_{p1} \geq 10$. Количество поглощаемого тепла также зависит от разности энергий инжектированных из n_1 -области электронов и энергии электронов в p_1 -области, то есть $A = \frac{w_2}{w_1} \cong \frac{E_{g2}}{E_{g1}}$, где A – коэффициент, учитывающий соотношение энергий электронов в узкозонном w_1 и широкозонном w_2 полупроводниках; E_{g1}, E_{g2} – ширина запрещенной зоны узкозонного и широкозонного полупроводников. Для $n_0\text{Ge} - p_0\text{GaAs}$ гетероперехода коэффициент $A = E_{g2}/E_{g1} = 1,43 / 0,66 \cong 2,2$.

Для обеспечения максимальной инжекции электронов из n_1 -области узкозонного полупроводника в p_1 -область широкозонного полупроводника, то есть исключения потерь на границе контакта n_0-p_0 обедненных областей и узкозонный материал (Ge) и широкозонный материал (GaAs) выбираются с одинаковыми структурой и постоянными решеток a_1 и a_2 , а относительное их изменение $\Delta = \left(\frac{2(a_2-a_1)}{a_2+a_1}\right) \cdot 100 \leq 2\%$.

Для гетероперехода $n_0\text{Ge} - p_0\text{GaAs}$ $\Delta \cong 1\%$. Для повышения эффективности отбора тепла из охлаждаемого объема ТХЭ устанавливается на радиатор.

При подаче питающего напряжения прямой полярности U_n через коммутатор на внешние выводы термоэлектрического холодильного элемента n_1 -области начинает инжектировать через n_0-p_0 гетеропереход электроны в p_1 -область. Плотность тока через n_0-p_0 гетеропереход определяется из выражения

$$I \cong I_S \left[\exp\left(\frac{eU_n}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

и экспоненциально возрастает с повышением питающего напряжения. В (1) I_S – ток насыщения; e, k, T – соответственно заряд электрона, постоянная Больцмана, температура. Инжектирующие в p_1 -область электроны на расстоянии диффузионной длины L_d поглощают из кристаллической решетки этой области энергию и повышают ее до величины энергии электронов p_1 -области. В результате отбора энергии инжектированными

электронами от кристаллической решетки p_1 -области ее температура и соответственно температура ТХЭ понижается. Величина поглощаемой тепловой энергии определяется зависимостью

$$Q_n = \Pi It, \quad (2)$$

где Π – коэффициент Пельтье; $I = JS$ – ток, протекающий через n_0-p_0 гетеропереход сечением S ; t – время протекания тока. Коэффициент Пельтье для $n-p$ гетероперехода из невырожденных полупроводников определяется из зависимости

$$\Pi = A \frac{kT}{e} \ln \frac{n_2}{n_1}, \quad (3)$$

где A – коэффициент, учитывающий соотношение энергии электронов в p и n областях; n_1 и n_2 – концентрация собственных электронов в n - и p -областях.

Повышение диапазона рабочих отрицательных температур в предложенном ТХЭ по сравнению с аналогами, где используется $p-n$ гомопереход, обусловлено существенным повышением коэффициента Пельтье. Для предлагаемого $n_0\text{Ge} - p_0\text{GaAs}$ гетероперехода с n_1 - и p_1 -областями коэффициент $A = 2,2$, а соотношение $\ln n_2/n_1 \leq 6$. Поэтому с учетом (2) поглощаемая тепловая энергия предлагаемым ТХЭ по сравнению с прототипом возрастает в $n = 2,2 \cdot \frac{10}{6} \cong 3,7$ раз.

Повышение стабильности работы предложенного устройства в сравнении с аналогами заключается в существенном упрощении ее конструкции и использовании в качестве теплопоглощающей области широкозонного полупроводника.

Экспериментальный термоэлектрический холодильный элемент при плотности прямого тока 1 А/см^2 позволяет получать предельную температуру охлаждения $-25 \text{ }^\circ\text{C}$, расчетная надежность безотказной работы устройства составляет $\sim 10^5$ часов.

На базе предлагаемого устройства при использовании матрицы элементов может быть создан термохолодильник требуемых объемов охлаждения и температур.

Технико-экономические преимущества предлагаемого термоэлектрического холодильного элемента в сравнении с аналогами [2]:

– более чем в два раза возрастает предельная температура охлаждения.

– более чем в 3 раз повышается стабильность работы термоэлектрического холодильного элемента.

Литература

1. Thermoelectric cooler and fabrication method : pat. US 5064476 / Leonard J. Recine. – Publ. 17.09.1990.
2. Усиленное термоэлектрическое охлаждение на холодных границах раздела переходов / U. Ghoshol. [и др.] // Epl. Phys. Lett.. – 2002. – V. 34, № 16.

УДК 681.3

СИНТЕЗ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ Сычик В.А., Глухманчук В.В., Уласюк Н.Н.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Предложен метод синтеза структуры полупроводникового преобразователя солнечной энергии в электрическую, при котором изготавливают диэлектрическую подложку с синусоидальным периодическим профилем поверхности, формируют на этой поверхности первый омический контакт и последовательно наносят на образовавшуюся структуру сильнолегированный p^+ -слой из одного широкозонного полупроводника, затем наносят на p^+ -слой электропроводящий просветляющий слой, по периметру которого формируют второй омический металлический контакт.

Ключевые слова: полупроводник, солнечная энергия, p - n переход, гармоническая поверхность, подложка, лазерная обработка, омический контакт, ионноплазменное распыление, термоотжиг.

SYNTHESIS OF SEMICONDUCTOR SOLAR ENERGY CONVERTER

Sychyk V.A., Gluhmanchuk V.V., Ulasiuk M.M.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A method has been proposed for synthesizing the structure of a semiconductor converter of solar energy into electrical energy, in which a dielectric substrate with a sinusoidal periodic surface profile is manufactured, the first ohmic contact is formed on this surface and a heavily doped p^+ -layer from one wide-gap semiconductor is sequentially applied to the resulting structure, then applied to the p^+ -layer an electrically conductive antireflection layer, along the perimeter of which a second ohmic metal contact is formed.

Key words: semiconductor, solar energy, p - n junction, harmonic surface, substrate, laser treatment, ohmic contact, ion plasma sputtering, thermal ignition.

Адрес для переписки: Сычик В.А. пр-т Рокоссовского, 49-18, г. Минск, 220095, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by

Преобразователи солнечной энергии в электрическую являются важнейшими устройствами возобновляемых источников электрической энергии. Наиболее высокими электрофизическими свойствами обладают полупроводниковые преобразователи солнечной энергии на основе p - n структур [1; 2], причем их свойства существенно зависят от конструктивной и технологической реализации их структуры. Разработан способ формирования структуры преобразователя солнечной энергии в электрическую [1], в котором существенно повышается активная полезная площадь.

На диэлектрической подложке, например керамической или пластмассовой, заданной толщины путем формовки, ионно-лучевого фрезерования, лазерной обработки создают синусоидально-гармоническую поверхность в плоскости XU , которую полируют, например в ультразвуковой камере, соответствующей суспензией, очищают от поверхностных загрязнений и сушат в инфракрасной установке.

На очищенную поверхность методом электронно-лучевого распыления конформно, то есть равномерно, наносят слой металла-омического контакта к формируемой фоточувствительной структуре. Толщина металлического слоя составляет 3–5 мкм, скорость его нанесения в пределах 40–100 Å/с, температура подложки T составляет 150–250 °С.

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии на слой омического контакта наносят сильнолегированный n^+ -слой из широкозонного полупроводника, например кремния, толщиной 0,1–0,3 мкм со скоростью 10–30 Å/с при температуре подложки 250–300 °С. Легирующий элемент – фосфор, а концентрация легирующей донорной примеси $N_D = 10^{20}$ – 10^{21} см³.

Наносят на той же установке молекулярно-лучевой эпитаксии i -слой собственного полупроводника-кремния толщиной 0,7–0,91, где L_a – длина свободного пробега оптически генерированных носителей заряда. Температура $T = 200$ – 500 °С, а скорость формирования i -слоя V составляет 30–50 Å/с.

На этой же установке в едином технологическом процессе формируют p^+ -слой фоточувствительной структуры толщиной 0Д-0»31< при температуре подложки 200–500 °С. Легирующая примесь – бор, концентрация легирующей акцепторной примеси $N_A = 10^{20}$ – 10^{21} см³, скорость формирования p^+ -слоя составляет 10–30 Å/с. Фоточувствительную p^+ - i - n^+ -структуру формируют из одного и того же широкозонного полупроводника, например кремния.

На сформированный p^+ -слой широкозонного полупроводника-кремния наносят методом ионно-плазменного распыления электропроводящий слой из светопрозрачного материала, напри-

мер из окиси олова-индия, толщиной 1–2 мкм, который является омическим контактом к p^* -слою широкозонного полупроводника и просветляющим слоем. Скорость нанесения электропроводящего слоя составляет 10–30 Å/с, а температура подложки $T = 250\text{--}400\text{ }^\circ\text{C}$. Методом электронно-лучевого распыления по наружному периметру электропроводящего слоя наносят металлический слой шириной 1–2 мм, толщиной 3–5 мкм, являющийся вторым омическим контактом.

Затем методом пайки или методом приклеивания электропроводящим клеем на основе эпоксидной смолы и серебряного порошка присоединяют внешние металлические алюминиевые выводы к металлическим омическим контактам.

Завершающей операцией способа изготовления полупроводникового преобразователя солнечной энергии в электрическую является термоотжиг сформированной p^+i-n^+ фоточувствительной структуры в инертной среде в течение 10–15 мин при температуре 200–400 °С для создания надежных омических контактов к p^+ - и n^+ -слоям широкозонного полупроводника. Структура преобразователя солнечной энергии, синтезированная указанным способом, приведена на рисунке 1.

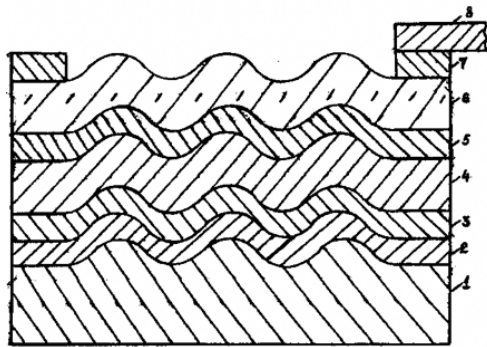


Рисунок 1 – Структура преобразователя солнечной энергии

Изготовление полупроводникового преобразователя солнечной энергии в электрическую на диэлектрической поликарбонатной подложке с фоточувствительной p^+i-n^+ структурой с омическими контактами в соответствии с представленной на рисунке 1 схемой, включает следующие технологические операции:

1. На диэлектрической подложке 1 из поликарбоната размером 38×38 мм, толщиной 2 мм методом лазерной обработки создают синусоидально-гармоническую поверхность в плоскости XY. Амплитуда синусоидально-гармонической поверхности составляет 1 мм, а ее длина волны равна 2 мм.

2. Полируют обработанную поверхность подложки 1 в ультразвуковой камере с алмазной суспензией в течение 20 мин, затем очищают поверхность подложки от загрязнений промывкой подложки 1 в мыльном растворе, деонизированной

воде, сушкой в инфракрасной установке при температуре 150 °С в течение 5 мин.

3. На подготовленную чистую синусоидально-гармоническую поверхность подложки 1 методом электронно-лучевого распыления наносят слой алюминия 2 – омического контакта к формируемой фоточувствительной структуре толщиной 5 мкм. Скорость нанесения слоя Al составляет 86 Å/с, а температура подложки 1 $T = 250\text{ }^\circ\text{C}$.

4. Методом молекулярно-лучевой эпитаксии на слой алюминия 2 наносят сильно легированный n^+ -слой широкозонного полупроводника кремния 3 толщиной 0,5 мкм при скорости формирования слоя кремния 3 20 Å/с и температуре подложки 300 °С. Легирующая донорная примесь-фосфор, а концентрация донорной примеси в n^+ -слое кремния 3 $N_D = 5 \cdot 10^{20}\text{ см}^{-3}$.

5. Наносят методом молекулярно-лучевой эпитаксии на той же установке i -слой кремния 4 толщиной 2 мкм. Скорость формирования i -слоя кремния 4 составляет 30 Å/с, а температур подложки 4 $T = 300\text{ }^\circ\text{C}$.

6. На той же установке методом молекулярно-лучевой эпитаксии формируют на i -слое кремния 4 сильнолегированный p^+ -слой кремния 5 толщиной 0,3 мкм при скорости формирования p^+ -слоя кремния 5 $V = 20\text{ Å/с}$ и температуре подложки 300 °С. Легирующая акцепторная примесь бор, а концентрация акцепторной примеси в p^+ -слое кремния 5 $N_A = 5 \cdot 10^{20}\text{ см}^{-3}$.

7. На сформированный p^+ -слой кремния 5 методом ионноплазменного распыления наносят проводящий слой 6 из светопрозрачного материала-окись олова толщиной 2 мкм, который является омическим контактом к p^+ -слою кремния 5 и просветляющим слоем. Скорость нанесения проводящего слоя 6 составляет 30 Å/с, а температура подложки $T = 300\text{ }^\circ\text{C}$.

8. По наружному периметру электропроводящего слоя 6 методом электронно-лучевого распыления формируют слой алюминия 7 шириной 2 мм и толщиной 5 мкм, являющийся вторым омическим контактом. Скорость распыления слоя алюминия составляет 80 Å/с, температура подложки 1 $T = 250\text{ }^\circ\text{C}$.

9. Присоединяют по отработанной технологии склеивания к нижнему омическому контакту-слою алюминия 2 и к верхнему омическому контакту-слою алюминия 7 с помощью клея с консистенцией 40 % эпоксидная смола и 60 % серебряный порошок внешние омические выводы алюминиевые площадки 8 шириной 3 мм и толщиной 1 мм.

10. Производят термоотжиг изготовленного полупроводникового преобразователя солнечной энергии в электричество с фоточувствительной n^+i-p^+ структурой в инертной (аргоновой) среде в течение 15 мин при температуре 300 °С для создания надежных омических контактов к n^+ - и p^+ -слоям фоточувствительной структуры.

Изготовленный предложенным способом полупроводниковый преобразователь солнечной энергии в электрическую фоточувствительной структурой n^+-i-p^+ типа в виде двух последовательно соединенных переходов широкозонного полупроводника кремния размером 38×38 мм с разветвленной поверхностной структурой при интенсивности солнечного излучения 65 мВт/см^2 позволяет получить рабочий ток 2 А, рабочее напряжение 0,9 В, полезную выходную мощность 1,8 Вт и время безотказной работы не менее 10^5 ч.

Созданный способ изготовления полупроводникового преобразователя солнечной энергии в электрическую обладает следующими преимуществами перед способами – аналогами:

– более чем на порядок повышается активная полезная площадь устройства;

– в среднем в 5 раз возрастает выходная мощность устройства;

– повышается производительность процесса изготовления полупроводникового преобразователя солнечной энергии в электричество вследствие исключения длительных процессов термической диффузии.

Литература

1. Фотоэлектрические явления в солнечных элементах / Ю.В. Николаев [и др.] // Физика и техн. полупроводников. – 2002. – Вып. 36, № 9. – С. 1128–1132.
2. Ермаков, О.Н. Светодиоды на основе эпитаксиальных р-п структур / О.Н. Ермаков, В.Н. Мартынов // Изв. вузов.: материалы электронной техники. – 2002. – № 3. – С. 68–71.
3. Носов, Ю.Р. Новые поколения светодиодов. Сборник научных трудов / Ю.Р. Носов. – М : МГУП, 2021. – С. 31–37.

УДК 621.78

ИСТОЧНИК ХОЛОДНОЙ ВОДЫ Сычик В.А., Русан В.И., Уласюк Н.Н.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Источник холодной воды, содержащий теплообменник, систему орошения воздуха, патрубков подачи воздуха, снабжен холодильной машиной с воздушным и водяным конденсаторами, дополнительным теплообменником и контроллером.

Ключевые слова: источник, вода, теплообменник, конденсатор, холодильная машина, испарительная установка, вентиль воздуха, контроллер.

COLD WATER SOURCE Sychyk V.A., Rusan V.I., Ulasiuk M.M.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. A cold water source containing a heat exchanger, an air irrigation system, an air supply pipe, is equipped with a refrigeration machine with air and water condensers, an additional heat exchanger and a controller.

Keywords: source, water, heat exchanger, condenser, refrigeration machine, evaporation unit, air valve, controller.

*Адрес для переписки: Сычик В.А. пр-т Рокоссовского, 49-18, г. Минск, 220095, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by*

Источник холодной воды широко используется для систем производства чистой холодной воды, кондиционирования воздуха и технологических нужд. Нами создана структура источника холодной воды, обладающая широким температурным диапазоном охлаждаемой воды и высокой производительностью генератора холодной воды.

Структурная схема источника холодной воды изображена на рисунке 1.

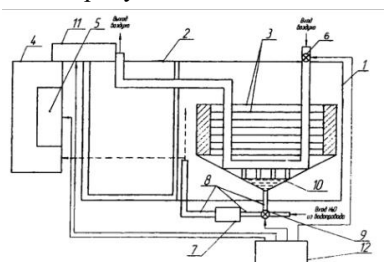


Рисунок 1 – Источник холодной воды

Структурно источник холодной воды состоит из закрытой испарительной установки 1 (градирни), включающей теплообменник с двойными стенками 2 и пластинчатый теплообменник 3 холодильной установки 4 с компрессором 5. Подача воздуха в закрытую испарительную установку 1 регулируется вентилем воздуха 6. Подпитка водой из водопровода в закрытой испарительной установке 1 производится насосом 7 посредством размещенного на трубопроводе 8 вентиля воды 9, соединенного с поддоном 10 пластинчатого теплообменника 3, в который воздух поступает через вентиль воздуха 6. Работой всех функциональных устройств, блоков и контролем их параметров руководит электронный контроллер 12. Система орошения 11 функционально связывает закрытую испарительную установку 1 с холодильной установкой 4.

Теплообменник с двойными стенками 2 выполнен из пропилена, обладающего высокой теплопроводностью.

Пластинчатый теплообменник 3, обеспечивающий передачу тепла от охлаждаемой воды и тепла конденсации от закрытой испарительной установки 1, выполнен из легированной стали. Холодильная установка 4 состоит из двух разделительных сетей циркуляции хладагента с тремя или четырьмя ступенями регулирования мощности. Пластинчатый теплообменник 3, выполненный из легированной стали, предназначен для работы в качестве водяного конденсатора генератора холодной воды.

Производство холодной воды в источнике холодной воды происходит автоматически в многоступенчатых его процессах. В зависимости от потребности система этого источника оптимально настраивается на высокий коэффициент эффективности охлаждения воды или на повышенную производительность.

При низкой окружающей температуре достаточно одного испарительного способа охлаждения до требуемой температуры воды, а при высокой температуре наружного воздуха система источника холодной воды автоматически настраивается на совместную работу испарительного охлаждения и на охлаждение с помощью холодильной установки с компрессором.

Генератор холодной воды функционирует в четырех следующих режимах:

1. Прямое охлаждение воды. При низкой температуре и влажности наружного воздуха уменьшение температуры в источнике холодной воды происходит путем прямого охлаждения воды с помощью этого воздуха. При увеличении нагрузки на охлаждение или при повышении температуры окружающей среды включается система орошения. За счет испарения орошающей воды снижается температура воздуха в пластинчатом теплообменнике помощью которого охлаждается до требуемой температуры конденсированная холодная вода.

2. Частичное прямое и испарительное охлаждение воды. При существенном повышении температуры и влажности наружного воздуха снижается эффективность испарительного охлаждения, что не позволяет достичь требуемой температуры холодной воды. В этом случае включается в ра-

боту холодильная установка и вода дополнительно охлаждается в закрытой испарительной установке. Конденсатор холодильной установки охлаждается в потоке выбросного воздуха.

3. Прямое испарительное охлаждение воды. При дальнейшем увеличении нагрузки на холодильную установку, когда невозможно передать получаемое при охлаждении тепло потоку выбросного воздуха, с помощью вентиля воды и трубопровода часть охлаждаемой воды переключается на водяной конденсатор холодильной установки. Давление в водяном конденсаторе регулируется с помощью электронного контроллера для обеспечения оптимального коэффициента преобразования энергии.

4. Охлаждение с помощью холодильной машины. Если температура поступающей после второй ступени охлаждения воды превышает требуемую, то нагрузка охлаждения воды ложится на холодильную установку компрессором. Для передачи воспринятого от воды тепла через двухступенчатую систему воздушного и водяного конденсаторов холодильной установки требуется незначительный расход воздуха.

Получаемое с помощью испарительного охлаждения системой орошения и холодильной установки охлаждение воды обеспечивает расширение температурного диапазона охлаждения воды и повышение производительности работы генератора холодильной.

Технико-экономические преимущества предлагаемого источника холодной воды в сравнении с аналогами:

- температурный диапазон охлаждаемой воды вследствие дополнительного использования холодильной машины возрастает в среднем в два раза;
- производительность генератора холодной воды повышается более чем в два раза в результате использования в нем холодильной машины;
- надежность работы генератора холодной воды повышается более чем в полтора раза вследствие упрощения его конструкции.

Промышленное освоение источника холодной воды возможно на предприятиях машиностроительной промышленности.

УДК 681.3

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ СВЕТОДИОДНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

Сычик В.А., Уласюк Н.Н.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Полупроводниковый светодиодный элемент, содержащий p - и n -слой, омические контакты к ним, выполнен p - i - n структурой из широкозонного полупроводника с сильнолегированными p^+ - и n^+ -слоями толщиной $(0,7-0,9)Ld$, а толщина i -слоя собственной проводимости равна $(1,1-1,6)Ld$, где Ld – диффузионная длина носителей заряда.

Ключевые слова: полупроводник, p - n переход, металлическое основание, омический контакт, концентрация примеси, сильнолегированный слой, рекомбинация носителей, потенциальный барьер.

SEMICONDUCTOR LED ELEMENT

Sychyk V.A., Ulasiuk M.M.

Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A semiconductor LED element containing a p - and n -layer, ohmic contacts to them, is made of a p - i - n structure from a wide-gap semiconductor with highly regulated p^+ - and n^+ - layers with a thickness of $(0.7-0.9)Ld$, and the thickness of the i -layer intrinsic conductivity is equal to $(1.1-1.6)Ld$, where Ld is the diffusion length of charge carriers.

Keywords: semiconductor, p - n junction, metal base, ohmic contact, impurity concentration, heavily doped layer, carrier recombination, potential barrier.

Адрес для переписки: Сычик В.А. пр-т Рокоссовского, 49-18, г. Минск, 220095, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by

Полупроводниковый светодиодные элементы являются базовыми структурами полупроводниковых светодиодов-важнейших приборов оптоэлектроники, которые эффективно используются в системах освещения, в качестве цифровых индикаторов и устройств измерительных преобразователей [1].

Разработан полупроводниковый элемент на основе p^+ - i - n^+ структуры, обладающий высокими электрооптическими свойствами.

Структура полупроводникового светодиодного элемента (ПСДЭ) изображена на рисунке 1.

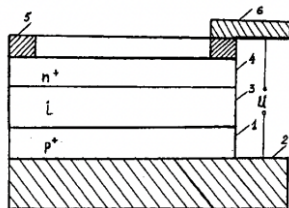


Рисунок 1 – Структура полупроводникового светодиодного элемента

Конструктивно ПСДЭ состоит из полупроводниковой p - i - n структуры, из широкозонного полупроводника, включающей p^+ -слой 1, размещенный на металлическом основании 2, являющийся омическим контактом к p^+ -слою 1, i -слой 3 собственной проводимости и n^+ -слой 4, по периметру которого нанесен омический контакт 5 с внешним выводом 6.

i -слой полупроводниковой p - i - n структуры, который с p^+ -слоем создает первый p^+ - i переход и с n^+ -слоем создает второй n^+ - i переход, изготов-

ливается как и p^+ -слой и n^+ -слой из широкозонного полупроводника, обладающего большой подвижностью носителей, большой диффузионной длиной, низкой концентрацией собственных носителей заряда и возможностью создавать в его объеме сильнолегированные слои, это например арсенид галлия. Толщина i -слоя определяется сто процентной рекомбинацией инжектированных в его область через прямосмещенные p^+ - i первый переход дырок и n^+ - i второй прямосмещенный переход электронов и составляет $(1,1-1,6)Ld$, где Ld – диффузионная длина носителей заряда. Сильнолегированный p^+ -слой широкозонного полупроводника сформирован на металлическом основании путем введения акцепторной примеси с высокой концентрацией $N_A \cong (10^{20}-10^{21}) \text{ см}^{-3}$, обладает малым электросопротивлением и обеспечивает омический контакт с металлическим основанием. Его толщина определяется максимальным переносом инжектированных в него от внешнего источника питания потоком дырок и, как показали результаты эксперимента, составляет $(0,7-0,9)Ld$. Аналогичной концентрацией легирующей донорной примеси ($N_D \cong (10^{20}-10^{21}) \text{ см}^{-3}$) обладает n^+ -слой, размещенный на i -слое. Его толщина также определяется максимальным переносом инжектированным в него от внешнего источника питания потоком электронов и составляет $(0,7-0,9)Ld$. Омическим контактом к сильнолегированному n^+ -слою является проводящий слой толщиной $1,0-5 \text{ мкм}$, на котором размещен внешний металлический вывод. К внешним выводам прикладывается напряжение питания.

Полупроводниковый светодиодный элемент работает следующим образом.

При подаче напряжения питания U_a прямой полярности через внешние выводы 1 и 6 на полупроводниковый светодиод, потенциальные барьеры p^+-i и n^+-i переходов φ_{01} и φ_{02} снижаются соответственно на величину eU_1 и eU_2 , то есть $\varphi_1 = \varphi_{01} - eU_1$ и $\varphi_2 = \varphi_{02} - eU_2$. Поскольку ток в $p-i-n$ структуре неизменный, то соответственно $U_1 = U_2 = U$. Потоки инжектированных электронов из n^+ -слоя и дырок из p^+ -слоя в i -слой собственной проводимости составят

$$I_n \cong I_p = I_s \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

где I_s – ток насыщения перехода.

При этом концентрации инжектированных в i -слой 3 электронов и дырок составят

$$\begin{aligned} \Delta n &\cong n_i \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right], \\ \Delta p &\cong n_i \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

В i -слое собственной проводимости инжектированные электроны и дырки полностью рекомбинируют друг с другом по механизму зона-зона с выделением в каждом акте рекомбинации квантов света. Длина волны выделяемого светового излучения

$$\lambda = hc/E_g, \quad (3)$$

где h – постоянная Планка, c – скорость света, E_g – ширина запрещенной зоны i -слоя. Яркость светового излучения светодиода пропорциональна проходящему через него току $V = V_0(I_g - I_n)$, где I_g , I_n – соответственно прямой ток светодиода и его пороговый ток, V_0 – постоянная светодиода, $V_0 \cong 0,1-2,5$ мА. Поскольку сильнолегированные p^+ -слой 1 и n^+ -слой обладают высокой проводимостью и падения напряжения на этих слоях минимальны, то ток через светодиод, а следовательно и яркость его

светового излучения экспоненциально возрастают с ростом приложенного напряжения питания.

Создано экспериментальное устройство – полупроводниковый светодиод, выполненный на цинковом основании со структурой p^+-i-n^+ на основе арсенида галлия. n^+ -слой выполнен из GaAs, легированного Te с концентрацией примеси $N_D \cong 5 \cdot 10^{20}$ см⁻³ и толщиной 0,8 мкм; i -слой собственной проводимости сформирован из GaAs с собственной концентрацией $n_i = p_i \cong 10^{10}$ см⁻³ и толщиной 1,6 мкм; p^+ -слой выполнен из GaAs, легированного Zn с концентрацией $N_A \cong 5 \cdot 10^{20}$ см⁻³, обладает толщиной 0,9 мкм. Верхний омический контакт выполнен из олова шириной 20 мкм и толщиной 5 мкм, к которому подключен внешний вывод из никеля.

Экспериментальный полупроводниковый светодиод размером полезной площади 10 мм² при величине протекающего прямого тока в интервале 50–100 мА обеспечивает оптическое излучение в видимой области яркостью $V = 150-200$ кэ/см². КПД полупроводникового светодиода достигает 24 %, а КПД аналогов не превышает 15 %.

Предлагаемый полупроводниковый светодиодный элемент в сравнении с аналогами:

1. Более чем в два раза возрастает яркость выходного светового излучения.
2. Более чем в 1,5 раза возрастает КПД.

Промышленное освоение предлагаемого полупроводникового светодиодного элемента возможно на предприятиях электронной промышленности.

Литература

1. Ермаков, О.Н. Светодиоды на основе эпитаксиальных $p-n$ структур / О.Н. Ермаков, В.Н. Мартынов // Изв. вузов. Материалы электронной техники. – 2002. – № 3. – С. 68–71.
2. Носов, Ю.Р. Новые поколения светодиодов / Ю.Р. Носов // Сборник научных трудов. Мос. гос. ун-та. – М. : Изд-во МГУП, 2021. – С. 31–37.

УДК 535.37

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ «ФЛУОТАУ» ДЛЯ АНАЛИЗА КИНЕТИКИ ЗАТУХАНИЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ

Тарасов Д.С.^{1,2}, Самцов М.П.¹, Радзько А.Е.¹, Красноперов Н.Н.¹, Шевченко К.А.¹, Воропай Е.С.²

¹НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ

²Белорусский государственный университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработан программный модуль «ФлуоТау» для анализа затухания флуоресценции, методом время-коррелированного счета фотонов. Программный модуль «ФлуоТау» позволяет аппроксимировать кинетику затухания флуоресценции моделью до 5 экспонент, имеет большую гибкость в настройке начальных и граничных условий аппроксимации.

Ключевые слова: метод время-коррелированного счета фотонов, анализ кинетики затухания флуоресценции.

SOFTWARE MODULE "FLUOTAU" FOR FLUORESCENCE DECAY KINETICS ANALYSIS
Tarasov D.S.^{1,2}, Samtsov M.P.¹, Radzko A.E.¹, Krasnoperov N.N.¹, Shevchenko K.A.¹, Voropay E.S.²

¹A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University

²Belarusian State University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A "FluoTau" software module has been developed to analyze the kinetics of fluorescence decay obtained using the time-correlated single photon counting method. The software module allows to approximate the fluorescence decay by 5 exponentials, and has great flexibility in setting the initial and boundary conditions of the approximation.

Key words: time-correlated single photon counting method, analysis of fluorescence decay kinetics.

Адрес для переписки: Н.Н. Красноперов, ул. Курчатова 7, г. Минск, 220045, Республика Беларусь
e-mail: dmitrij-tarasov@list.ru

Введение. Люминесцентный анализ один из наиболее информативных спектральных методов исследования объектов в различных областях науки. В последние два десятилетия с развитием аппаратуры для измерения временных характеристик свечения люминесценции его применение значительно расширилось. Получения кинетики затухания сегодня стал метод время-коррелированного счета фотонов. Прежде всего это обусловлено появлением мегагерцовых импульсных лазерных источников с субнаносекундной и пикосекундной длительностью, а также развитием микроэлектронной базы. Эталонным методом для получения кинетики затухания сегодня стал метод время-коррелированного счета фотонов. В лаборатории спектроскопии НИИПФП им. А.Н. Севченко выполняется разработка лазерного спектрофлуориметра для спектрально-кинетического люминесцентного анализа в экспериментальной физике и биологии. Измерения кинетических характеристик флуоресценции предполагается реализовать по методу время-коррелированного счета фотонов. На данном этапе проекта разработаны прототипы/макеты отдельных узлов спектрофлуориметра: импульсных светодиодных и лазерных источников, время-амплитудного преобразователя (ВАП), схемы временной привязки (СВП), блока управления, одноквантового и КМОП-многоканального фотоприемных устройств (ОФУ и МФУ).

Параллельно ведется разработка программного обеспечения (ПО) для объединения отдельных узлов в единый программно-аппаратный комплекс, включая программный модуль «ФлуоТау» для анализа кинетики затухания флуоресценции. На базе спектрофлуориметра Fluorolog (SPEX, США) создан макет для апробации отдельных узлов и тестирования ПО.

Программный модуль для анализа кинетики затухания флуоресценции. Известно, что для однокомпонентных молекулярных систем характерным является одноэкспоненциальный закон затухания флуоресценции. В случае нескольких невзаимодействующих флуоресцирующих центров закон затухания будет представлен суммой экспонент:

$$I(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cdot e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (1)$$

Поскольку длительности возбуждающего импульса и отклика регистрирующей фотосистемы нередко сопоставимы с временем затухания флуоресценции исследуемых объектов, то регистрируемый сигнал флуоресценции в момент времени t представляет собой свертку вида:

$$F(t) = \int_0^t G(t') I(t-t') dt', \quad (2)$$

где $G(t)$ – аппаратная функция, которая определяется как отклик системы регистрации на возбуждающий световой импульс.

Закон затухания флуоресценции исследуемых молекул можно установить путем решения задачи деконволюции. В его основе минимизация функционала χ^2 , который представляет собой взвешенное среднеквадратичное отклонение рассчитанного закона затухания флуоресценции $F_{\text{расч}}(t_i)$ от зарегистрированного $F_{\text{эксп}}(t_i)$:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n w_i [F_{\text{эксп}}(t_i) - F_{\text{расч}}(t_i)], \quad (3)$$

где w_i весовые коэффициенты:

$$w_i = \frac{1/F_{\text{эксп}}(t_i)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1/F_{\text{эксп}}(t_i)}. \quad (4)$$

Данный подход используется в разработанном программном модуле «ФлуоТау». Принимая во внимание нелинейную зависимость функционала χ^2 от t_i , для ускорения вычислений использован метод Левенберга-Марквардта для нелинейного метода наименьших квадратов [1]. Программный модуль выполнен в виде оконного приложения для системы Windows (рисунок 1).

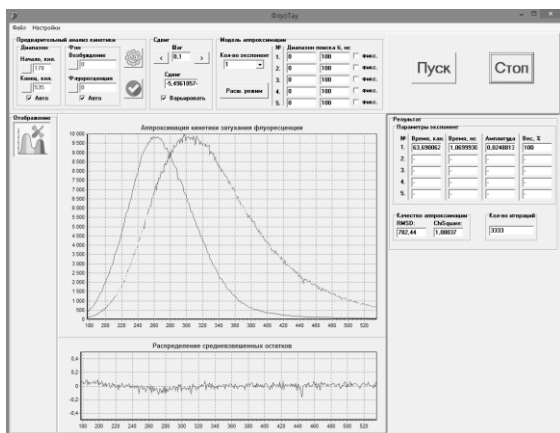


Рисунок 1 – Вид главного окна программного модуля «ФлуоТау»

В качестве варьируемых параметров в модель оптимизации также включен временной сдвиг между аппаратной функцией и кинетикой затухания флуоресценции образца.

Тестирование программного модуля. В процессе разработки программного модуля «ФлуоТау» корректность работы алгоритма расчета

проверена на сгенерированных модельных данных в виде свертки известной аппаратной функции и теоретического закона затухания, представленного суммой нескольких экспонент с известными временами затухания и весами (амплитудами).

В полученные кинетики дополнительно добавлялась шумовая компонента с разным уровнем шума. В результате анализа с помощью программного модуля «ФлуоТау» с использованием моделей аппроксимации от 1 до 5 экспонент наилучший результат аппроксимации достигался при совпадении количества экспонент в моделях генерации исходных данных и их аппроксимации. С использованием макета на базе спектрофлуориметра Fluorolog проведена апробация отдельных узлов лазерного спектрофлуориметра. Зарегистрированы кинетики затухания различных образцов с известными в литературе временами затухания флуоресценции (растворы красителей родамин 6Ж и НТС в этаноле). В результате аппроксимации полученных кинетик с помощью стандартного режима программного модуля «ФлуоТау» получены времена затухания флуоресценции, которые в пределах погрешности совпадают со значениями в литературе: родамин 6Ж в этаноле – 4,0 нс [2], НТС в этаноле – 1,4 нс [3].

Закключение. Таким образом, разработан программный модуль «ФлуоТау» для анализа кинетики затухания флуоресценции. Программный модуль «ФлуоТау» позволяет аппроксимировать кинетику затухания флуоресценции моделью до 5 экспонент, имеет большую гибкость в настройке начальных и граничных условий аппроксимации.

Литература

1. Grinvald, A. On analysis of fluorescence decay kinetics by the method of least-squares / A. Grinvald, I.Z. Steinberg // *Anal. Biochem.* – 1974. – Vol. 59. – P. 583.
2. Berezin, M.Y. Fluorescence lifetime measurements and biological imaging / M.Y. Berezin, S. Achilefu // *Chemical reviews.* – 2010. – Vol. 110, №. 5. – P. 2641–2684.
3. Концентрационное увеличение квантового выхода образования синглетного кислорода индотрикарбониновым красителем / М.П. Самцов [и др.] // *Журнал прикладной спектроскопии.* – 2014. – Т. 81, № 2. – С. 219–227.

УДК 654.026

ПОСТРОЕНИЕ ЗАЩИЩЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Чернов П.С.

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»
Пенза, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрена актуальная проблема построения информационно-измерительных комплексов и систем, защищенных от внешних угроз. Предложена математическая модель архитектуры таких комплексов и алгоритм ее оптимизации.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, архитектура, защита информации.

CONSTRUCTION OF SECURE MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Chernov P.S.

Penza State University,
Penza, Russian Federation

Abstract. We discuss the problem of creating information-measuring complexes and systems protected from external threats. A mathematical model of the architecture and an algorithm for its optimization are proposed.

Key words: measurement system, architecture, information security.

Адрес для переписки: Чернов П.С., ул. Красная, 40, г. Пенза, 440026, Российская Федерация
e-mail: pvllvp@yandex.ru

Типичная информационно-измерительная и управляющая система (ИИУС) состоит из множества физических, логических и программных составляющих, каждая из которых является объектом интереса с точки зрения оптимизации технических характеристик и информационной безопасности.

В настоящее время к ИИУС предъявляются высокие требования к безопасности и защите информации, которая осуществляется на каждом из физических и логических уровней. Защита на физическом уровне обычно осуществляется шифрованием дисков системы хранения данных (СХД) и серверного оборудования (СО), защитой каналов связи центров обработки данных (ЦОД) и вычислительных кластеров (ВК). Основной проблемой является отсутствие отечественного оборудования и низкоуровневого ПО отечественной разработки для зарубежного оборудования (BIOS, UEFI, драйверы).

На следующем уровне происходит виртуализация физических ресурсов. В РФ она регламентируется ГОСТ Р 56938-2016 [1]. Стандартом рассмотрены такие угрозы как: атаки на гипервизор; атаки на защищаемые виртуальные устройства и виртуальные машины; угрозы выхода процесса за пределы виртуальной машины; угрозы несанкционированного доступа к данным за пределами зарезервированного адресного пространства; нарушения изоляции данных внутри виртуальной машины; нарушения процедуры аутентификации субъектов виртуального информационного взаимодействия; перехвата управления гипервизором; угрозы неконтролируемого роста числа виртуальных машин или зарезервированных вычислительных ресурсов; угрозы несанкционированного внесения изменений в образы виртуальных машин; угрозы ошибок обновления гипервизора.

Средства администрирования и мониторинга следующего уровня иерархии представляют собой операционные системы и высокоуровневые программные средства не так сильно привязанные к аппаратной составляющей [2]. В РФ единственной операционной системой, имеющей сертификат ФСТЭК, является ОС Astra Linux. Реализуемая в настоящее время программа перехода на отечественное ПО подразумевает замену ОС семейства Windows на ОС Astra Linux и прикладное ПО под данную ОС.

Клиентские стационарные устройства также могут работать под управлением ОС Astra Linux. Для мобильных платформ полноценно заменить ОС Android на отечественное ПО пока не удастся. Хотя существуют дистрибутивы Astra Linux под архитектуры ARM и Эльбрус и несколько альтернативных ОС, например, ОС Аврора, большая номенклатура быстро меняющихся аппаратных компонент зарубежного производства не позволяют оперативно разрабатывать драйвера для периферии и оперативно выпускать обновления ОС.

С малогабаритными интеллектуальными датчиками в плане импортозамещения ситуация обстоит несколько лучше. Существуют отечественные микроконтроллеры и операционные системы реального времени. Однако имеется и ряд проблем, таких как отсутствие единых стандартов.

Классические облачные решения связаны с задачами резервирования, скрытия внутренней сетевой инфраструктуры, приоритизации трафика, резервирования данных. Существует ряд проблем, возникающих при попытке построения защищенных ИИУС: отсутствие унифицированного протокола информационного взаимодействия; средств защиты информации, учитывающих специфику маршрутизации в современных беспроводных сетях;

доступа к распределенным информационным ресурсам и базам данных.

Архитектура оказывает огромное влияние на важнейшие технические характеристики ИИУС: защищенность, быстродействие, надежность, цена. Разработка архитектуры, которая удовлетворяет всем требованиям технического задания, является сложной задачей. Использование эвристического метода в настоящее время не оправдано, а поиск и оптимизацию архитектуры целесообразно проводить посредством математических методов системного анализа, которые в данном случае сводятся к многокритериальной оптимизации.

Предлагаемая модель архитектуры A ИИУС, описывается множеством ее узлов N и их взаимосвязей $R = \{N_i, N_j\}$, то есть представляет собой граф:

$$A = \{N_1, N_2, \dots, N_n, R_{12}, R_{13}, \dots, R_{mk}\}. \quad (1)$$

Сами узлы N_i могут быть достаточно сложными элементами, также описываемыми множеством:

$$N = \left\{ \begin{matrix} RT_1, RT_2, \dots, RT_n \\ CC_1, CC_2, \dots, CC_m \\ DC_1, DC_2, \dots, DC_k \end{matrix} \right\}, \quad (2)$$

где RT_1 – RT_n – маршрутизаторы; C_1 – C_m – вычислительные кластеры; DC_1 – DC_k – датацентры.

Архитектура может изменяться в некоторых пределах без изменения функционального назначения комплекса. Такими степенями свободы могут быть: количество узлов N , количество связей R , топология сети, распределение программного обеспечения по узлам, замена программного обеспечения узлов на альтернативное, замена аппаратной составляющей узлов, и др.

Таким образом, в рамках данной модели задача оптимизации сводится к поиску архитектуры A , удовлетворяющей наложенным ограничениям (цена, производительность, надежность и пр.), описываемым соответствующими целевыми функциями f :

$$\min\{f_1(A), f_2(A), \dots, f_n(A)\}. \quad (3)$$

Целевые функции представляют собой функции вида $mem:A \rightarrow \mathbb{N}$, $proc:A \rightarrow \mathbb{N}$, $stor:A \rightarrow \mathbb{N}$ и др. Где mem , $proc$, $stor$ находят объемы памяти, хранилища, количество процессоров. Аналогично определяются функции, характеризующие связи между элементами: $bw:\{N_i, N_j\} \rightarrow \mathbb{R}$, $lat:\{N_i, N_j\} \rightarrow \mathbb{R}$, где bw и lat обозначают пропускную способность и временную задержку. В качестве критерия оптимальности предлагается использовать эффективность по Парето.

Особенностью таких систем является то, что на многие технические характеристики значительное влияние оказывает не только архитектура, но и работа отдельного узла, вплоть до оконечного датчика. У каждого элемента системы также имеется набор параметров по которым возможно проведение оптимизации вследствие чего перед поиском эффективности по Парето для архитектуры предлагается производить оптимизации узлов N по своим собственным критериям r и целевым функциям g :

$$\forall N \forall R \in A: \min\{g_1(\bar{r}), g_2(\bar{r}), \dots, g_n(\bar{r})\}. \quad (4)$$

Конкретный вид целевых функций f и g зависит от типа критерия и технических требований к системе. Так стоимость является простой суммой цен на комплектующие в то время как, например, критерий защищенности системы обычно является сложной функцией множества величин:

$$S = \sum_i p_i(A) = \sum_i (\sum_j p_i(N_j) + \sum_{jk} p_i(R_{jk})), \quad (5)$$

где p_i – вероятность реализации i -й угрозы при использовании архитектуры A , узла N , связи R между двумя узлами;

Для исследования математической модели и поиска оптимальной архитектуры предлагается использовать генетический эволюционный алгоритм, обобщенный вид которого приведен на рисунке 1.

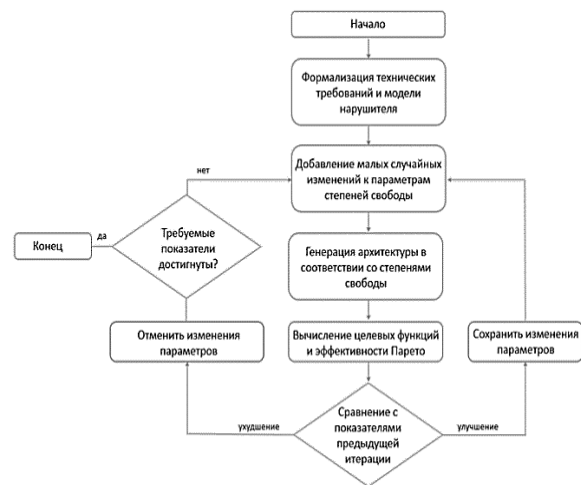


Рисунок 1 – Генетический алгоритм поиска оптимальной архитектуры

Литература

1. Защита информации при использовании технологий виртуализации : ГОСТ Р 56938-2016. – 2016.
2. Reese, G. Cloud Application Architectures: Building Applications and Infrastructure in the Cloud / G. Reese. – O'Reilly Media. – 2009.

УДК 621.315.592

ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Шарибаев Н.Ю., Юсупов Э.К., Махмудов Б.М., Холбоев Д.Ж.

*Наманганский инженерно-технологический институт
Наманган, Республика Узбекистан*

Аннотация. Показывается возможность определения ширины запрещенной зоны полупроводника с помощью математической модели температурной зависимости плотности состояний в широком энергетическом диапазоне. Определяется спектр ширины запрещенной зоны по модели и сравнивается с экспериментальными результатами. Разработана методика определения температурной зависимости ширины запрещенной зоны с помощью построенной модели температурной зависимости плотности состояний.

Ключевые слова: полупроводник, ширина запрещенной зоны, плотность состояний, энергетический спектр.

DETERMINATION OF THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE BANDGAP WIDTH OF SEMICONDUCTORS

N.Yu.Sharibaev, E.Yusupov, B.M.Makhmudov

*Namangan Institute of Engineering and Technology
Namangan, Republic of Uzbekistan*

Abstract. The possibility of determining the band gap of a semiconductor using a mathematical model of the temperature dependence of the density of states in a wide energy range is shown. The bandgap spectrum is determined from the model and compared with experimental results. A technique has been developed for determining the temperature dependence of the band gap using the constructed model of the temperature dependence of the density of states.

Key words: semiconductor, band gap, density of states, energy spectrum.

*Адрес для переписки: Шарибаев Н.Ю., ул Касансай, 7, г. Наманган, Республика Узбекистан
e-mail: sharibayev_niti@mail.ru*

Зависимость ширины запрещенной зоны полупроводника от температуры обсуждалась во многих работах [1–4]. В этих работах эффект объясняется изменением частоты фононов. При этом считается, что генерация электронно-дырочных пар сдвигает частоты колебаний решетки. Однако в этих работах не обсуждалось влияние теплового уширения энергетических уровней на изменение величины ширины энергетической щели. В работах [5–7] исследовано влияние температуры на форму плотности поверхностного состояния на границе раздела *Si-SiO₂*. Установлено, что энергетический спектр плотности поверхностного состояния сильно зависит от температуры. Показано, что разложение плотности поверхностного состояния в ряд по производной вероятности опустошения дискретного уровня с энергией *E* по энергии позволяет исследовать температурную зависимость плотности поверхностного состояния. Было показано, что увеличение температуры стимулирует переход дискретного энергетического спектра в непрерывный спектр и, наоборот, с понижением температуры непрерывный спектр переходит в дискретный. Возникает вопрос, нельзя ли применить это разложение для анализа влияния температуры для исследования температурной зависимости ширины запрещенной зоны кристалла. Для исследования температурной зависимости энергетического спектра плотности

состояния полупроводника в разрешенных зонах *N_s* разложим в ряд по *GN(E_i, E, T)* – функциям [7]

$$N_s = \sum_{i=1}^n N_{s_i}(E_i) \frac{1}{kT} \exp\left(\frac{1}{kT}(E_i - E_0) - \exp\left(\frac{1}{kT}(E_i - E_0)\right)\right) \quad (1)$$

Функция

$$GN(E_j, E, T) = \frac{1}{kT} \exp\left(\frac{1}{kT}(E_i - E_0) - \exp\left(\frac{1}{kT}(E_i - E_0)\right)\right) \text{ при } T \rightarrow 0$$

стремится к дельта функции Дирака.

Для упрощения расчетов предположим, что плотности состояния в запрещенной зоне и в валентной зоне *N_v* является постоянной величиной, а в запрещенной зоне она равна нулю.

$$\begin{aligned} N_s(E_i) &= N_c \text{ при } E > E_c \\ N_s(E_i) &= 0 \text{ при } E > E_v \\ N_s(E_i) &= N_v \text{ при } E < E_v \end{aligned} \quad (2)$$

В этом случае, для различных значений температур, можно получить графики плотности состояния *N_s(E, T)*. На рисунке 1 показаны графики *N_s(E, T)* для трех разных температур. Из рисунка 1, а видно, что при низкой температуре *T = 10 К* график *N_s(E, T)* имеет прямоугольную форму. На краю ЗП значение *N_s(E, T)* резко падает от до нуля. У потолка ВЗ величина *N_s(E, T)* резко поднимается от нуля до *N_v*. В этом случае значение ШЗЗ равняется

$$E_g(T) = E_c(T) - E_v(T). \quad (3)$$

С ростом температуры границы между запрещенной зоной и разрешенными зонами начинают размываться. На рисунок 1, *b* показан график плотности состояния при температуре $T = 300$ К.

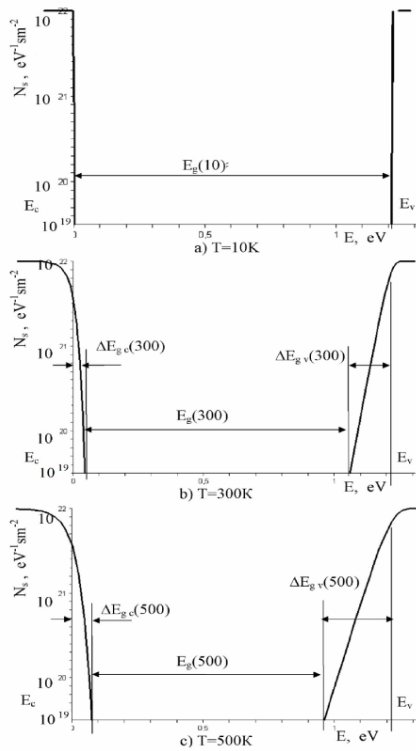


Рисунок 1 – Спектр плотности состояния, рассчитанный при различных температурах. С ростом температуры ширина запрещенная зона уменьшается: *a*) $T = 10$ К; *b*) $T = 300$ К; *c*) $T = 500$ К

Из этого рисунка видно, что границы зон проводимости и валентная зона начинают заметно проникать вглубь запрещенная зона полупроводника. Это приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны образца. Дальнейшее повышение температуры еще сильнее размывает прямоугольную форму плотности состояния. На рисунке 1, *c* показана энергетическая зона при $T = 500$ К.

С повышением температуры проникновение электронных состояний зона проводимости и валентная зона в запрещенную зону усиливается. Вследствие этого ширина энергетической щели значительно сужается. Графики плотности состояния для различных значений температур позволяют анализировать влияние температуры на значения ширины запрещенной зоны полупроводника. В частности, используя графики рисунок 1 можно оценить порядок значений β -температурного коэффициента изменения ширины ЗЗ. Проводим сравнение с экспериментом. Оценку проведем по формуле

$$\beta = \frac{E_g(T_1) - E_g(T_2)}{T_2 - T_1} \quad (4)$$

Подставим значения E_g для соответствующих температур и получим значения β порядка

10^{-4} эВ/К. Для большинства полупроводников порядок этой величины совпадает с экспериментальными значениями (таблица 1).

Таблица 1. Коэффициент термической зависимости ширины энергетической щели для различных полупроводников [8; 9]

Материал	$\beta, 10^{-4}$ эВ/К	Материал	$\beta, 10^{-4}$ эВ/К
Si	-4,00	As ₂ Se ₃	-10,00
Ge	-4,00	AsSe ₂ Te	-9,80
B	-3,50	As ₂ SeTe ₂	-10,06

Экспериментальные значения β для различных материалов, полученных различными методами, приведены в таблице 1 [8; 9]. Как видно из таблицы, численные значения β по порядку величины близки между собой. Сравнение теоретических значений β , оцененных из графиков рисунка 1 и β из таблицы 1 показывает, что для большинства материалов эти величины близки к экспериментальным. Однако при расчете β для некоторых материалов из таблицы 1 согласие оказывается не таким хорошим. Это может быть объяснено существованием возможности одновременных воздействий нескольких других механизмов изменения ширины запрещенной зоны [8]. Отсюда следует, что результирующее изменение ширины запрещенной зоны должно учитывать, помимо известных механизмов изменения ширины энергетической щели, также тепловое уширение энергетических уровней разрешенных зон. Применение метода разложения плотности энергетических состояний по $GN(E_j, E, T)$ функциям для исследования температурной зависимости ширины запрещенной зоны показало, что за счет термического уширения энергетических состояний энергетические щели между разрешенными состояниями уменьшаются.

Численные анализы математической модели температурной зависимости ширины запрещенной зоны с помощью этого метода показывает, что коэффициент термического уширения ширины энергетической щели по порядку величины совпадает с экспериментальными данными большинства полупроводниковых материалов.

Литература

1. Емельянов, А.М. // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35, вып. 6. – С. 9–16.
2. Ридли, Б. Квантовые процессы в полупроводниках / Б. Ридли. – М.: Мир, 1986. – 304 с.
3. Heine V., Van Vechten // J. Phys. Rev. – 1976. – Vol. 13. – P. 16–22.
4. Фридкин, В.М. // Сегнетоэлектрики-полупроводники / В.М. Фридкин. – М.: Наука, 1976. – С. 408.
5. Определение ППС на границу раздела полупроводник диэлектрик в структурах $Al-SiO_2-Si$ и $Al-SiO_2-n-Si < Ni >$ при низкой температуре / Г. Гулямов [и др.] // Узбекский физический журнал. – 2010. – Т. 12, № 3. – С. 143–146.
6. Гулямов Г., Шарипбаев Н.Ю. // Физическая инженерия поверхности. – 2010. – Т. 8, № 1. – С. 53–68.

7. Гулямов, Г. Определение ППС границы раздела, полупроводник–диэлектрик, в МДП–структуре / Г. Гулямов, Н.Ю. Шарипаев // ФТП – Санкт Петербург. – 2011. – Т. 45, № 2. – С. 178–182.

8. Мотт, Н. Электронные процессы в некристаллических веществах / Н. Мотт, Э. Девис. – М. : Мир, 1982.

9. Баранский, П.И. Полупроводниковая электроника справочник / П.И. Баранский, В.П. Клочков, И.В. Потыкевич. – Киев : Наукова думка, 1975. – 704 с.

УДК 621.317:004.315

РЕАЛИЗАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СИГНАЛА ЗОНДА КЕЛЬВИНА НА БАЗЕ ПЛИС XILINX

Ясько Н.С., Тявловский А.К., Борисенок С.В., Микитевич В.А., Забагонский К.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрена реализация цифрового спектрального анализа измерительного сигнала сканирующего зонда Кельвина в реальном масштабе времени. Для реализации требуемого математического базиса быстрого преобразования Фурье принята ПЛИС типа *FPGA* семейства *Xilinx Ultrascale+*. Необходимые быстродействие и точность преобразования обеспечиваются использованием в качестве умножителей универсальных блоков цифровой обработки *DSP48E2*.

Ключевые слова: зонд Кельвина, спектральный анализ, быстрое преобразование Фурье, программируемая логическая интегральная схема.

SPECTRAL ANALYSIS OF A KELVIN PROBE OUTPUT SIGNAL USING XILINX FPGA

Yasko N.S., Tyavlovsky A.K., Borisenok S.V., Mikitevich V.A., Zabogonsky K.A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The implementation of digital spectral analysis to the output signal of a scanning Kelvin probe in a real-time mode is considered. The required mathematical basis of a fast Fourier transform is implemented in *Xilinx Ultrascale+* series *FPGA*. The necessary speed and accuracy of conversion are ensured by using *DSP48E2* universal digital processing units as multipliers.

Key words: Kelvin probe, spectral analysis, fast Fourier transform, field programmable gate array.

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

Измерительный сигнал сканирующего зонда Кельвина, используемого при неразрушающем контроле состояния прецизионных поверхностей зондовым электрометрическим методом [1], характеризуется сложным спектральным составом, что связано с нелинейностью системы «вибрирующий зонд – поверхность образца». Анализ этого спектрального состава позволяет извлечь из сигнала дополнительную информацию. В частности, соотношение амплитуд первой и второй гармоник сигнала позволяет, в дополнение к информации о пространственном распределении относительных значений работы выхода электрона, восстановить профиль поверхности вдоль линии сканирования [2]. Для достаточной производительности измерений при сканировании поверхности с высоким пространственным разрешением такой анализ должен проводиться в реальном масштабе времени, при этом время выполнения вычислений должно быть сопоставимо со временем установления сигнала на выходе зонда.

Использование в качестве измерительного преобразователя цифрового зонда Кельвина [3] позволяет повысить точность и воспроизводимость измерений, однако накладывает дополнительные

ограничения на методы обработки сигнала, которые должны быть цифровыми (дискретными). Из числа таких методов для спектрального анализа осциллографических сигналов широко используется алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ или *FFT – Fast Fourier Transform*). Несмотря на распространенность и относительную простоту реализации, в применении к анализу измерительного сигнала цифрового зонда Кельвина этот метод имеет ряд недостатков.

Основной из них – это требование использовать для БПФ только сигналы определенной длины, конкретно – длина сигнала в выборках должна быть целой степенью двойки: допустимо провести БПФ с массивом из 1024 (или 512, или 2048) точек сигнала, но не с массивом из 1000 (или 500 или 2000) точек. В результате, обычный калибровочный сигнал частотой 1 кГц, снятый на частоте дискретизации 10 МГц, невозможно подвергнуть БПФ на его длине периода, который в этих условиях будет составлять 1000 точек. Следует либо использовать для анализа область несколько больше – 1024 периода сигнала (и тем самым гарантированно указать спектр сигнала, поскольку преобразование Фурье должно проводиться на интервале, в

точности равном периоду сигнала либо кратном ему), либо предварительно провести передискретизацию тысячечеточечного сигнала на виртуальную частоту дискретизации 10,24 МГц, и, возможно, исказить в результате применяемой интерполяции форму сигнала, что в итоге также приведет к искажениям спектра.

Другая проблема – дискретность самого исходного сигнала. Отсчеты цифрового зонда Кельвина фиксируются в определенные моменты времени, и информация о состоянии сигнала в промежутках между этими точками отсутствует. В результате, обычная нестабильность обрабатываемого дискретизированного сигнала по оси времени в ± 1 выборку, может приводить, при относительно невысокой частоте дискретизации к заметным искажениям. Пусть на интервале в 1024 точки мы наблюдаем 20–30 периодов исследуемого сигнала. Это будет соответствовать 30–50 точкам измерений на один период, т. е. ошибка на 1–2 выборки приведет к ошибке периода БПФ в 2–7 %, которая выразится в возникновении заметных ложных артефактов на изображении спектра.

В рамках решения поставленной задачи минимизация указанных недостатков достигается использованием метода БПФ, известного как «бабочка». Данный метод предусматривает умножение входных данных на поворачивающие коэффициенты (*twiddle factor*). Для БПФ есть две классические схемы преобразования – децимация по частоте (*DIF, decimation-in-frequency*) и децимация по времени (*DIT, decimation-in-time*). Для *DIT* алгоритма характерно разбиение входной последовательности на две последовательности половинной длительности, а для *DIF* алгоритма – на две последовательности четных и нечетных отсчетов длительностью *NFFT*. Кроме того, эти алгоритмы отличаются математическими действиями для операции «бабочка»

Поскольку входные данные представляют собой комплексные величины, то аппаратная реализация «бабочки» требует один комплексный множитель (4 операции умножения и 2 операции сложения) и два комплексных сумматора (4 операции сложения). Реализация такого математического базиса возможна на ПЛИС типа *FPGA*.

Следует отметить, что все математические операции на *FPGA* зачастую выполняются в дополнительном коде (*2's complement*). Множитель на ПЛИС можно реализовать двумя способами – на элементах базовой логики, используя триггеры и таблицы *LUT*, или на специальных блоках вычисления *DSP48*. В первом случае умножение реализуется с помощью алгоритма Бута или его модификаций, требует значительных логических ресурсов и далеко не всегда удовлетворяет временным ограничениям на высоких частотах обработки данных. В связи с этим, множители на ПЛИС в современных проектах практически всегда проектируются на базе *DSP48* узлов.

В среде проектирования *Xilinx* имеются стандартные бесплатные *IP*-ядра для вычисления математических функций на базе узла *DSP48*. Они позволяют вычислять примитивные математические функции и выставлять различные задержки на входе и выходе узла. У *Xilinx* это *IP-Core «multiplier»*, которое позволяет конфигурировать множитель на любую разрядность входных данных от 2 до 64 бит. Кроме того, можно задать способ реализации множителя – на логических ресурсах или встроенных примитивах *DSP48*.

Основное ограничение, накладываемое на ячейки *DSP48* – разрядность входных данных. В узле *DSP48E1*, который является базовой ячейкой ПЛИС *Xilinx* 6 и 7 серии разрядность портов входа для умножения: «A» – 25 бит, «B» – 18 бит, следовательно, результат умножения представляет 43-битное число. Для семейства ПЛИС *Xilinx Ultrascale* и *Ultrascale+* узел претерпел несколько изменений, в частности разрядность первого порта выросла на два бита: «A» – 27 бит, «B» – 18 бит. Сам узел получил обозначение *DSP48E2*.

Для увеличения эффективности все вычисления проводятся в специальном 23-битном формате с плавающей запятой *FP23*. Это прогрессивная реализация алгоритмов *FP18* и *FP27*, на базе которых построена вся логика. Формат *FP23* специально адаптирован к архитектуре ПЛИС и учитывает внутренние особенности работы блоков кристалла, таких как универсальный блок цифровой обработки *DSP48* и блоки памяти *RAMB18*. Применение формата с плавающей запятой обеспечивает высокую точность обработки сигналов с АЦП вне зависимости от их амплитуды и позволяет избежать вычислительной ошибки при масштабировании данных, свойственной системам с целочисленным аппаратным вычислением с ограничением по разрядности вычислений

Конвейер ядра БПФ построен так, что данные на его вход должны поступать в естественном порядке, а на выходе БПФ формируется поток данных в разрядно-инверсном порядке. Для ОБПФ все наоборот – данные на входе в двоично-инверсном порядке, а на выходе в естественном или натуральном порядке. В этом состоит главное преимущество использованной связки БПФ и ОБПФ по сравнению с готовыми ядрами от *Xilinx*, для которых данные на входе должны быть строго в натуральном порядке, а данные на выходе зависят от включенной опции.

Литература

1. Неразрушающий контроль изделий с прецизионными поверхностями на основе методов зондовой электрометрии / Р.И. Воробей [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2016. – № 1. – С. 4–17.
2. Тявловский, А.К. Математическое моделирование дистанционной зависимости разрешающей способности сканирующего зонда Кельвина / А.К. Тявловский // Приборы и методы измерений. – 2012. – № 1(4). – С. 30–36.
3. Цифровой измеритель контактной разности потенциалов / К.В. Пантелеев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 136–144.

УДК 621.317:004.315

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ НА SOC XILINX ZYNQ7010

Ясько Н.С., Тявловский А.К., Париза И.А., Микитевич В.А., Борисенок С.В.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Использование цифровых методов измерения контактной разности потенциалов приводит к формированию дополнительного шума дискретизации, а также, вследствие отсутствия у цифрового зонда Кельвина эффекта интеграции сигнала, повышает чувствительность измерительной системы к внешним электромагнитным наводкам. Для борьбы с такого рода шумами и помехами предлагается использовать методы цифровой фильтрации сигналов на основе фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтра). Рассмотрена реализация такого фильтра с использованием процессорной системы Zynq.

Ключевые слова: сканирующий зонд Кельвина, цифровая фильтрация, БИХ-фильтр, КИХ-фильтр, IP-ядро.

SOFTWARE REALIZATION OF DIGITAL FILTERS ON A SOC XILINX ZYNQ7010

Yasko N.S., Tyavlovsky A.K., Parisa I.A., Mikitevich V.A., Borisenok S.V.

Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The use of digital methods for measuring contact potential difference leads to the formation of additional sampling noise, and also, due to the lack of a signal integration effect in a digital Kelvin probe, the sensitivity of the measuring system to external electromagnetic interference increases. To reduce these noise and interference a digital filtering approach based on finite impulse response (FIR) filter is proposed. Practical implementation of such filter is based on Zynq processor system.

Key words: scanning Kelvin probe, digital filtering, IIR filter, FIR filter, IP core.

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

Скорость и точность измерения относятся к числу основных требований, предъявляемым к сканирующим системам неразрушающего контроля, в частности, к системам зондовой электрометрии. При использовании метода сканирующих зондов Кельвина (СКП) повышение быстродействия с одновременным улучшением отношения сигнал/шум за счет работы в режиме большого сигнала может быть достигнуто переходом к цифровым методам обработки сигнала – так называемому цифровому зонду Кельвина [1]. В то же время, использование таких методов приводит к формированию дополнительного шума дискретизации, а также, вследствие отсутствия у цифрового зонда эффекта интеграции сигнала, повышает чувствительность измерительной системы к внешним электромагнитным наводкам. Для борьбы с такого рода шумами и помехами целесообразно использовать методы цифровой фильтрации сигналов.

При анализе целесообразности использования в составе цифрового зонда Кельвина цифровых фильтров с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтров) и с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтров) учитывалось следующее:

1. Фазовая характеристика КИХ-фильтров полностью линейна, тогда как фазовая характеристика БИХ-фильтров нелинейна на краях частотных полос.

2. Поскольку БИХ-фильтры используют рекурсивные обратные связи, их устойчивость в общем случае не может быть гарантирована.

3. БИХ-фильтр может быть преобразован в эквивалентный аналоговый фильтр и наоборот, для КИХ-фильтра такое преобразование невозможно. В то же время, с использованием КИХ-фильтра может быть реализована произвольная частотная характеристика, невозможная для аналогового фильтра.

4. Синтез КИХ-фильтров алгебраически сложнее, чем БИХ-фильтров, что требует использования компьютерных средств при их разработке, однако для своей работы КИХ-фильтр требует меньшей вычислительной мощности.

5. Вследствие рекуррентности БИХ-фильтры анизотропны по времени, вследствие чего пропускание отсчетов одного и того же сигнала через БИХ-фильтр в прямом и обратном порядке даст в общем случае различные результаты несмотря на то, что спектр входного сигнала останется неизменным.

Исходя из этого, критерии использования КИХ- и БИХ-фильтров были определены следующим образом:

– использование БИХ-фильтров целесообразно в тех случаях, когда единственными важными требованиями являются характеристика с резкими срезами и высокая пропускная способность, поскольку БИХ-фильтры (особенно те, в

которых использованы эллиптические характеристики) потребуют определения меньшего числа коэффициентов, чем КИХ-фильтры;

– использование КИХ-фильтров целесообразно, если число коэффициентов фильтров не очень велико и, в частности, если нужно, чтобы фазовое искажение отсутствовало или было малым.

Решаемая задача борьбы с шумами и помехами сканирующего цифрового зонда Кельвина в реальном масштабе времени относится ко второму случаю. При этом скорость обработки сигнала программным КИХ-фильтром можно повы-

сить, воспользовавшись быстрым преобразованием Фурье (БПФ) с обработкой данных на разных скоростях.

Программная реализация КИХ-фильтра выполнена в среде разработки *Vivado 2021.1* с использованием стандартных *IP-ядер* («*Intellectual Property*»). При описании фильтра использовался структурный язык программирования высокого уровня *VHDL*.

Разработанная структурная схема программной реализации КИХ-фильтра приведена на рисунке 1.

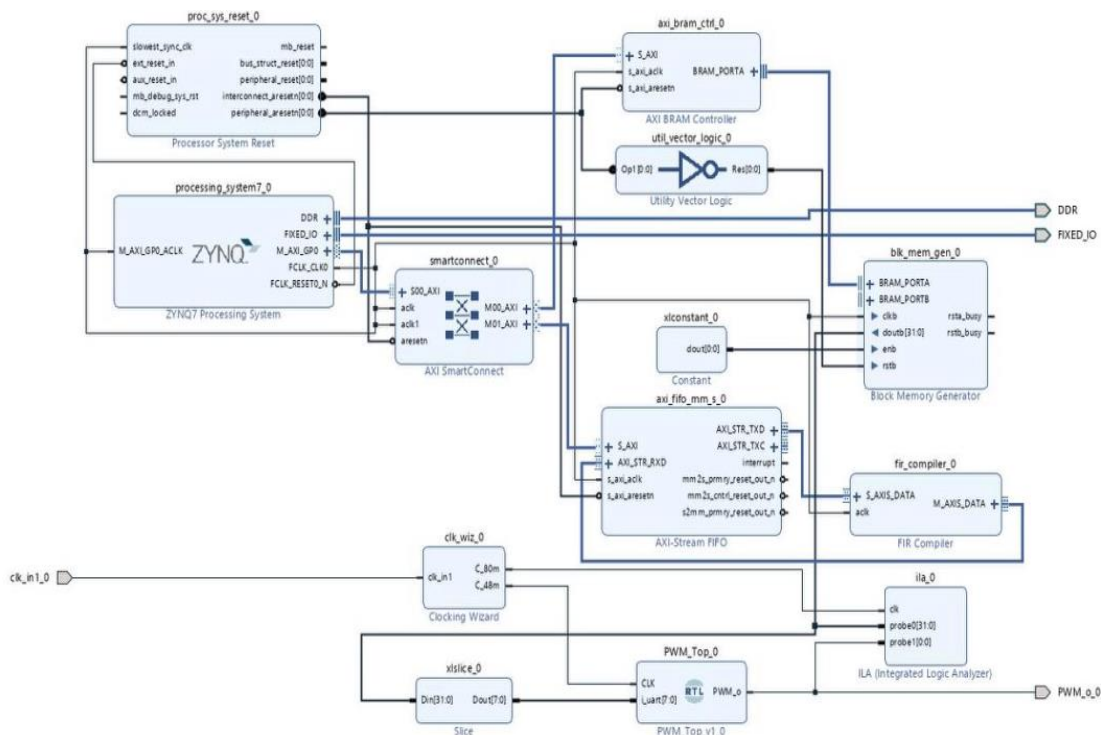


Рисунок 1 – Схема программной реализации КИХ-фильтра

В основу приведенной программной реализации положено использование процессорной системы *Zynq*. Данная система позволяет использовать уже готовые периферийные устройства (в частности, интерфейсные модули *UART*, *Ethernet*), а также обращаться к оперативному запоминающему устройству (ОЗУ), в том числе с использованием прямого доступа к памяти (ПДП). Сопряжение блоков, участвующих в обработке сигнала, осуществляется по 32-разрядной *AXI* шине. Исходя из этого, разрядность цифровых данных на входе фильтра также определена в 32 бита, что обеспечивает их обработку в реальном масштабе времени. Следует отметить, что используемый в составе цифрового зонда Кельвина аналого-цифровой преобразователь обеспечивает получение отсчетов с разрядностью до 48 бит, однако отображение таких данных существующими программными средствами не обеспечивается, вследствие чего увеличение разрядности свыше 32 бит не имеет практического смысла.

В качестве буфера данных в разработанном КИХ-фильтре используется *BRAM* память. Это двухпортовая память, обеспечивающая одновременное считывание и запись данных. Особенностью разработанного цифрового фильтра является использование буфера *BRAM* как для исходных необработанных отсчетов, поступающих через порт *UART*, так и для обработанных цифровым фильтром данных, подлежащих отправке на компьютер.

Для внутрисхемной отладки разработанного фильтра используется блок *ILA* (правый нижний край схемы). Этот блок представляет собой логический анализатор, который позволяет отслеживать состояния сигналов в реальном времени.

Литература

1. Цифровой измеритель контактной разности потенциалов / К.В. Пантелеев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 136–144.

УДК 621.396.96

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗ ОТДЕЛЬНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКА ХОЛОСТОГО ХОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

Исаев А.В., Любинский К.А., Голубович А.И., Гулич А.Ю., Адамович К.А., Веселовский В.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Работа посвящена математическому описанию по определению фаз отдельных спектральных составляющих тока холостого хода при работе электрической машины по временным параметрам исходного измерительного сигнала.

Ключевые слова: спектральные составляющие, начальная фаза, преобразование Фурье, ток холостого хода электрической машины.

DETERMINATION OF THE PHASES OF INDIVIDUAL SPECTRAL COMPONENTS OF THE NO-LOAD CURRENT OF AN ELECTRICAL MACHINE

Isaev A.V., Lyubinsky K.A., Golubovich A.I., Gulich A.Yu., Adamovich K.A., Veselovsky V.A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The work is devoted to a mathematical description of determining the phases of individual spectral components of the no-load current during operation of an electric machine according to the time parameters of the original measuring signal.

Key words: spectral components, initial phase, Fourier transform, no-load current of an electric machine.

Адрес для переписки: Исаев А.В., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: isaev0302@gmail.com

Контроль работоспособности электрических машин в процессе эксплуатации в основном заключается в измерении действующих значений токов в фазах и анализе переходных процессов в динамических режимах [1]. Используемый для этих целей анализ спектральных составляющих токов, несмотря на свои возможности, достаточно трудно реализовать в условиях эксплуатации электрических машин из-за непрекращающихся переходных процессов, при непрогнозируемых изменениях режимов работы. Быстротекущий характер этих изменений и инертность полосовых фильтров, выделяющих отдельные спектральные составляющие, не позволяют измерять их реальные значения. Кроме того, низкочастотные полосовые фильтры на частоте, кратной промышленной, обладают значительными габаритами и инерционностью. Однозначное соответствие временных параметров сигнала и его спектра, определяемого преобразованием Фурье, позволяет найти корреляцию между параметрами спектра сигнала и его временными характеристиками, измерение и контроль которых с помощью существующих измерительных средств возможно проинвестировать с достаточно высокой точностью.

В [2] был проведен анализ полученной зависимости в случае предположения, что точка максимума кривой (t_m) наступает в момент времени $T/4$, т. е. когда в модели не учитывается активное сопротивление катушки. Данное предположение характерно для идеальной электромагнитной системы, когда не учитывается активные потери обмоток и магнитопровода, а, следовательно, такое

упрощение вносит дополнительные существенные погрешности.

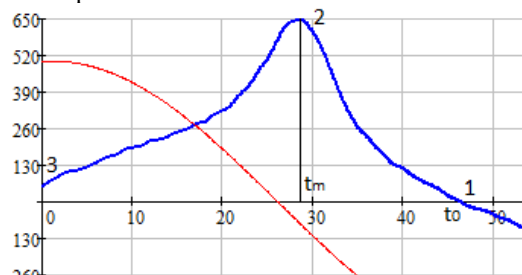


Рисунок 1 – Анализируемая кривая намагничивающего тока обмотки электрической машины: 1 – значение кривой тока в момент времени $t = t_0$; 2 – значение кривой тока в момент времени $t = t_m$; 3 – значение кривой тока в момент времени $t = 0$

Анализ кривой тока показывает, что в форме можно выделить несколько характерных точек: 1 – значение кривой тока $i(t)$ в момент времени $t = t_0$; 2 – значение I_m кривой тока $i(t)$ в момент времени $t = t_m$; 3 – значение I_0 кривой тока $i(t)$ в момент времени $t = 0$.

Известно, что любая периодическая кривая может быть представлена рядом Фурье в тригонометрической форме как:

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

где I_{mn} – амплитуды гармонических составляющих.

В точке 1 кривой $i(t)$ в момент времени $t = t_0$ равно нулю:

$$i(t_0) = \sum_{n=1}^{\infty} n I_{mn} \cos(n\omega t_{m1} + \varphi_n) = 0.$$

В точке 2 кривая тока $i(t)$ имеет максимум в момент времени $t = t_m$. Следовательно первая производная функции, описывающей кривую тока, в момент времени $t = t_m$ равно нулю:

$$\sum_{n=1}^{\infty} n I_{mn} \cos(n\omega t_{m1} + \varphi_n) = 0.$$

Точка 3 является точкой перегиба. Следовательно вторая производная функции, описывающей кривую тока, в момент времени $t = 0$ равно нулю:

$$-(n\omega)^2 \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \sin(n\omega t + \varphi_n) = 0$$

или

$$\sum_{n=1}^{\infty} n^2 I_{mn} \sin(\varphi_n) = 0.$$

Эти выражения представляют собой систему уравнений, связывавших временные параметры тока с параметрами гармонических составляющих.

Преобразуем первое уравнение:

$$I_{m1} \sin(\omega t_0 + \varphi_1) + \sum_{n=3}^{\infty} I_{mn} \sin(n\omega t_0 + \varphi_n) = 0$$

и разделим на составляющую первой гармоники:

$$1 + \sum_{n=3}^{\infty} \frac{I_{mn} \sin(n\omega t_0 + \varphi_n)}{I_{m1} \sin(\omega t_0 + \varphi_1)} = 0.$$

Аналогично преобразуем остальные уравнения. Таким образом получим преобразованную систему тригонометрических уравнений:

$$\begin{cases} 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_{mn} \sin(n\omega t_0 + \varphi_n)}{I_{m1} \sin(\omega t_0 + \varphi_1)} = 0 \\ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} n \frac{I_{mn} \cos(n\omega t_m + \varphi_n)}{I_{m1} \cos(\omega t_m + \varphi_1)} = 0 \\ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} n^2 \frac{I_{mn} \sin(\varphi_n)}{I_{m1} \sin(\varphi_1)} = 0. \end{cases}$$

Сложим второе и третье уравнение системы:

$$1 + \sum_{n=1}^{\infty} n \frac{I_{mn} \cos(n\omega t_m + \varphi_n)}{I_{m1} \cos(\omega t_m + \varphi_1)} + 1 + \sum_{n=1}^{\infty} n^2 \frac{I_{mn} \sin(\varphi_n)}{I_{m1} \sin(\varphi_1)} = 0,$$

или

$$1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_{mn}}{I_{m1}} \left(n \frac{\cos(n\omega t_m + \varphi_n)}{2 \cos(\omega t_m + \varphi_1)} + n^2 \frac{\sin(\varphi_n)}{2 \sin(\varphi_1)} \right) = 0.$$

Полученный результат приравняем к первому уравнению системы:

$$1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_{mn} \sin(n\omega t_0 + \varphi_n)}{I_{m1} \sin(\omega t_0 + \varphi_1)} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} n \frac{I_{mn}}{I_{m1}} \left(\frac{\cos(n\omega t_m + \varphi_n)}{2 \cos(\omega t_m + \varphi_1)} + n^2 \frac{\sin(\varphi_n)}{2 \sin(\varphi_1)} \right),$$

или

$$\frac{\sin(n\omega t_0 + \varphi_n)}{\sin(\omega t_0 + \varphi_1)} = n \frac{\cos(n\omega t_m + \varphi_n)}{2 \cos(\omega t_m + \varphi_1)} + n^2 \frac{\sin(\varphi_n)}{2 \sin(\varphi_1)}.$$

Согласно законам тригонометрии избавимся в уравнении от сумм углов в тригонометрических функциях

$$\begin{aligned} \frac{\sin \omega t_0 \cos \varphi_n + \cos \omega t_0 \sin \varphi_n}{\sin \omega t_0 \cos \varphi_1 + \cos \omega t_0 \sin \varphi_1} = \\ = n \frac{\cos n \omega t_m \cos \varphi_n - \sin n \omega t_m \sin \varphi_n}{2 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - 2 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1} + \\ + n^2 \frac{\sin(\varphi_n)}{2 \sin(\varphi_1)}, \end{aligned}$$

приведа к общему знаменателю получим:

$$\begin{aligned} & (n^2 \sin(\varphi_n)(\sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 + \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1) \times \\ & \times (2 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - 2 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1)) / \\ & (2 \sin(\varphi_1)(2 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - 2 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1) \times \\ & \times (\sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 + \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1)) + \\ & (2 \sin(\varphi_1)(n \cos n \omega t_m \cos \varphi_n - 2 \sin n \omega t_m \sin \varphi_n) \times \\ & \times (\sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 + \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1)) / \\ & (2 \sin(\varphi_1)(2 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - 2 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1) \times \\ & \times (\sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 + \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1)) - \\ & (2 \sin(\varphi_1)(\sin n \omega t_0 \cos \varphi_n + \cos n \omega t_0 \sin \varphi_n) \times \\ & \times (2 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - 2 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1)) / \\ & (2 \sin(\varphi_1)(2 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - 2 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1) \times \\ & \times (\sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 + \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1)) = 0. \end{aligned}$$

С учетом сходимости функции проведем анализ числителя полученного выражения

$$\begin{aligned} & n^2 \sin(\varphi_n)(\sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 + \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1) \times \\ & \times (2 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - 2 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1) + \\ & + 2 \sin(\varphi_1)(n \cos n \omega t_m \cos \varphi_n - 2 \sin n \omega t_m \sin \varphi_n) \times \\ & \times (\sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 + \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1) - 2 \sin(\varphi_1) \times \\ & \times (\sin n \omega t_0 \cos \varphi_n + \cos n \omega t_0 \sin \varphi_n) \times \\ & \times (2 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - 2 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1) = 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & n^2 \sin(\varphi_n) \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 2 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - \\ & - n^2 \sin(\varphi_n) \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 2 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1 + \\ & + n^2 \sin(\varphi_n) \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 2 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - \\ & - n^2 \sin(\varphi_n) \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 2 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1 + \\ & + 2 \sin(\varphi_1) n \cos n \omega t_m \cos \varphi_n \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 + \\ & + 2 \sin(\varphi_1) n \cos n \omega t_m \cos \varphi_n \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 - \\ & - 2 \sin(\varphi_1) n \sin n \omega t_m \sin \varphi_n \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 - \\ & - 2 \sin(\varphi_1) n \sin n \omega t_m \sin \varphi_n \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 - \\ & - 2 \sin(\varphi_1) n \sin n \omega t_0 \cos \varphi_n 2 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 + \\ & + 2 \sin(\varphi_1) \sin n \omega t_0 \cos \varphi_n 2 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1 - \\ & - 2 \sin(\varphi_1) n \cos n \omega t_0 \sin \varphi_n 2 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 + \\ & + 2 \sin(\varphi_1) \cos n \omega t_0 \sin \varphi_n 2 \cos n \omega t_m \sin \varphi_1 = 0. \end{aligned}$$

Делим на $\cos \varphi_n$:

$$\begin{aligned} & 2n^2 \operatorname{tg} \varphi_n \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - \\ & - 2n^2 \operatorname{tg} \varphi_n \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1 + \\ & + 2n^2 \operatorname{tg} \varphi_n \cos n \omega t_m \sin \varphi_1 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - \\ & - 2n^2 \operatorname{tg} \varphi_n \cos n \omega t_m \sin \varphi_1 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1 + \\ & + 2n \sin(\varphi_1) \cos n \omega t_m \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 + \\ & + 2n \sin(\varphi_1) \cos n \omega t_m \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 - \\ & - 2n^2 \sin(\varphi_1) \sin n \omega t_m \operatorname{tg} \varphi_n \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 - \\ & - 2n \sin(\varphi_1) \sin n \omega t_m \operatorname{tg} \varphi_n \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 - \\ & - 4 \sin(\varphi_1) \sin n \omega t_0 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 + \\ & + 4 \sin(\varphi_1) \sin n \omega t_0 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1 - \\ & - 4 \sin(\varphi_1) \cos n \omega t_0 \operatorname{tg} \varphi_n \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 + \\ & + 4 \sin(\varphi_1) \cos n \omega t_0 \operatorname{tg} \varphi_n \sin n \omega t_m \sin \varphi_1 = 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 2n^2 \operatorname{tg} \varphi_n \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - \\ & - 2n^2 \operatorname{tg} \varphi_n \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1 + \\ & + 2n^2 \operatorname{tg} \varphi_n \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - \\ & - 2n^2 \operatorname{tg} \varphi_n \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1 - \\ & - 2n \sin(\varphi_1) \sin n \omega t_m \operatorname{tg} \varphi_n \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 - \\ & - 2n \sin(\varphi_1) \sin n \omega t_m \operatorname{tg} \varphi_n \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 - \\ & - 4 \sin(\varphi_1) \cos n \omega t_0 \operatorname{tg} \varphi_n \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 + \\ & + 4 \sin(\varphi_1) \cos n \omega t_0 \operatorname{tg} \varphi_n \sin n \omega t_m \sin \varphi_1 = \\ & = -2n \sin(\varphi_1) \cos n \omega t_m \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 - \\ & - 2n \sin(\varphi_1) \cos n \omega t_m \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 + \\ & + 4 \sin(\varphi_1) \sin n \omega t_0 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - \\ & - 4 \sin(\varphi_1) \sin n \omega t_0 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & n^2 \sin(\varphi_n) (\sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 + \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1) \times \\ & \times (2 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - 2 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1) + \\ & + 2 \sin(\varphi_1) (n \cos n \omega t_m \cos \varphi_n - n \sin n \omega t_m \sin \varphi_n) \times \\ & \times (\sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 + \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1) - \\ & - 2 \sin(\varphi_1) (\sin n \omega t_0 \cos \varphi_n + \cos n \omega t_0 \sin \varphi_n) \times \\ & \times (2 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - 2 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1) = 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & n^2 \sin(\varphi_n) \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 2 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - \\ & - n^2 \sin(\varphi_n) \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 2 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1 + \\ & + n^2 \sin(\varphi_n) \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 2 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - \\ & - n^2 \sin(\varphi_n) \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 2 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1 + \\ & + 2 \sin(\varphi_1) n \cos n \omega t_m \cos \varphi_n \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 + \\ & + 2 \sin(\varphi_1) n \cos n \omega t_m \cos \varphi_n \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 - \\ & - 2 \sin(\varphi_1) n \sin n \omega t_m \sin \varphi_n \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 - \\ & - 2 \sin(\varphi_1) n \sin n \omega t_m \sin \varphi_n \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 - \\ & - 2 \sin(\varphi_1) \sin n \omega t_0 \cos \varphi_n 2 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 + \\ & + 2 \sin(\varphi_1) \sin n \omega t_0 \cos \varphi_n 2 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1 - \\ & - 2 \sin(\varphi_1) \cos n \omega t_0 \sin \varphi_n 2 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 + \\ & + 2 \sin(\varphi_1) \cos n \omega t_0 \sin \varphi_n 2 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1 = 0. \end{aligned}$$

Делим на $\cos \varphi_n$

$$\begin{aligned} & 2n^2 \operatorname{tg} \varphi_n \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - \\ & - 2n^2 \operatorname{tg} \varphi_n \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1 + \\ & + 2n^2 \operatorname{tg} \varphi_n \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - \\ & - 2n^2 \operatorname{tg} \varphi_n \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1 + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + 2n \sin(\varphi_1) \cos n \omega t_m \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 + \\ & + 2n \sin(\varphi_1) \cos n \omega t_m \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 - \\ & - 2n \sin(\varphi_1) \sin n \omega t_m \operatorname{tg} \varphi_n \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 - \\ & - 2n \sin(\varphi_1) \sin n \omega t_m \operatorname{tg} \varphi_n \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 - \\ & - 4 \sin(\varphi_1) \sin n \omega t_0 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 + \\ & + 4 \sin(\varphi_1) \sin n \omega t_0 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1 - \\ & - 4 \sin(\varphi_1) \cos n \omega t_0 \operatorname{tg} \varphi_n \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 + \\ & + 4 \sin(\varphi_1) \cos n \omega t_0 \operatorname{tg} \varphi_n \sin n \omega t_m \sin \varphi_1 = 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 2n^2 \operatorname{tg} \varphi_n \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - \\ & - 2n^2 \operatorname{tg} \varphi_n \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1 + \\ & + 2n^2 \operatorname{tg} \varphi_n \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - \\ & - 2n^2 \operatorname{tg} \varphi_n \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1 - \\ & - 2n \sin(\varphi_1) \sin n \omega t_m \operatorname{tg} \varphi_n \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 - \\ & - 2n \sin(\varphi_1) \sin n \omega t_m \operatorname{tg} \varphi_n \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 - \\ & - 4 \sin(\varphi_1) \cos n \omega t_0 \operatorname{tg} \varphi_n \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 + \\ & + 4 \sin(\varphi_1) \cos n \omega t_0 \operatorname{tg} \varphi_n \sin n \omega t_m \sin \varphi_1 = \\ & = -2n \sin(\varphi_1) \cos n \omega t_m \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 - \\ & - 2n \sin(\varphi_1) \cos n \omega t_m \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 + \\ & + 4 \sin(\varphi_1) \sin n \omega t_0 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - \\ & - 4 \sin(\varphi_1) \sin n \omega t_0 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \operatorname{tg} \varphi_n (2n^2 \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - \\ & - 2n^2 \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1 + \\ & + 2n^2 \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - \\ & - 2n^2 \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1 - \\ & - 2n \sin \varphi_1 \sin n \omega t_m \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 - \\ & - 2n \sin \varphi_1 \sin n \omega t_m \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 - \\ & - 4 \sin \varphi_1 \cos n \omega t_0 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 + \\ & + 4 \sin \varphi_1 \cos n \omega t_0 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1) = \\ & = -2n \sin \varphi_1 \cos n \omega t_m \sin n \omega t_0 \cos \varphi_1 \\ & - 2n \sin \varphi_1 \cos n \omega t_m \cos n \omega t_0 \sin \varphi_1 + \\ & + 4 \sin \varphi_1 \sin n \omega t_0 \cos n \omega t_m \cos \varphi_1 - \\ & - 4 \sin \varphi_1 \sin n \omega t_0 \sin n \omega t_m \sin \varphi_1. \end{aligned}$$

Следовательно:

$$\begin{aligned} & (\sin \varphi_1 (2 \sin n \omega t_0 \cos(n \omega t_m + \varphi_1) - \\ & - n \cos n \omega t_m \sin(n \omega t_0 + \varphi_1))) \times \\ \varphi_n = \operatorname{arctg} & \frac{(n^2 \cos(n \omega t_m + \varphi_1) \sin(n \omega t_0 + \varphi_1) - \\ & - n \sin \varphi_1 \sin n \omega t_m \sin(n \omega t_0 + \varphi_1) - \\ & 2 \sin \varphi_1 \cos n \omega t_0 \cos(n \omega t_m + \varphi_1))}{2} \\ & \times \pi \frac{1 + (-1)^{\frac{n+1}{2}}}{2}. \end{aligned}$$

Откуда видно, что фазу любой спектральной составляющей можно вычислить, зная или измерив несколько ключевых точек исследуемого сигнала.

Литература

1. Гемке, Р.Г. Неисправности электрических машин / Р.Г. Гемке. – 8-е изд., испр. и доп. – Л. : Энергия, 1995. – 296 с.
2. Цифровой способ измерения фазового сдвига гармонических колебаний: патент РФ 2419098С2 / А. Жук, Е.А. Плигин, А.М. Лягин, Д.В. Романько, А.А. Плехутина. – Опул. 20.05.2011.

Секция 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 004.93, 535.317,548.732

МЕТОДЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СЪЕМКИ В РЕНТГЕНОГРАФИИ

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

НИИ ПФП им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработана программа «X-ray Vox», которая вычисляет распределение интенсивности рентгеновского излучения на детекторе в зависимости от угла поворота объекта. Произведен расчет распределения интенсивности в зависимости от угла поворота объекта и расчет новых координат проективной формы объекта на основе оператора поворота. Выполнены численные эксперименты для прямоугольных пластин. Результат разностной съемки содержит положительную и отрицательную часть графика, позволяющий определить границы объекта. Разработана программа и алгоритмы для моделирования для моделирования и распознавания различных объектов. Выполнены экспериментальные исследования сеток и зонных пластинок с поворотом в рентгеновских лучах для получения изображения.
Ключевые слова: X-ray Vox, рентгеновское излучение, разностная съемка.

DIFFERENTIAL IMAGING METHODS IN RADIOGRAPHY

Balukho I.N., Dudchik Y.I., Trapenok N.V., Kolchevsky N.N.

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

Abstract. Developed the program "X-ray Box", which calculates the intensity distribution of X-ray emission on the detector depending on the rotation angle of the object. Calculated the intensity distribution based on the rotation angle of the object and calculated new coordinates of the projective form of the object on the basis of the rotation operator. Performed numerical experiments for rectangular plates. The result of the difference survey contains positive and negative parts of the graph, which allows to determine the boundaries of the object. Developed software and algorithms for modelling to simulate and recognise various objects. Performed experimental studies of meshes and zone plates with rotation in X-rays for obtaining an image.

Key words: X-ray Vox, X-ray emission, difference imaging.

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

Метод дифференциальной съемки используется для получения изображений слабопоглощающих рентгеновское излучение объектов [1]. Основу метода составляет получение двух изображений объекта при изменении углового положения, и формирование разностного изображения. Метод дифференциальной съемки направлен на обнаружение границ объектов, которые существенно изменяют пропускание при угловом повороте объекта. Этот принцип был заложен в основу программы «X-ray Vox».

Программа «X-ray Vox» моделирует процесс прохождения рентгеновских лучей, через объект при заданном угле поворота и рассчитывается распределение интенсивности на детекторе.

Формула, описывающая метод дифференциальной съемки, представляет собой следующее выражение:

$$I(x, y) = I_0 e^{-\mu(\lambda) \cdot D(a_x, a_y, a_z, x_0, y_0, z_0, \alpha, \beta, \gamma)}, \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность источника излучения, $\mu(\lambda)$ – линейный коэффициент поглощения материала объекта в зависимости от длины волны излучений λ ; $D(a_x, a_y, a_z, x_0, y_0, z_0, \alpha, \beta, \gamma)$ – толщина объекта

по направлению вектора (a_x, a_y, a_z) при повороте относительно оси (x_0, y_0, z_0) на угол (α, β, γ) .

Численные эксперименты выполнены для прямоугольных пластин размером 20–1000 мкм, для углов поворота от 1 до 90 градусов (рисунок 1). При повороте объекта толщина объекта меняется, и проективная форма объекта будет представлять собой трапецию, которая при увеличении угла свыше 40 градусов принимает треугольную форму (рисунок 1, а). Эффект «трапеции» при повороте объекта, приводит к изменению эффективной длины объекта, что также проявляется на изменении распределения интенсивности.

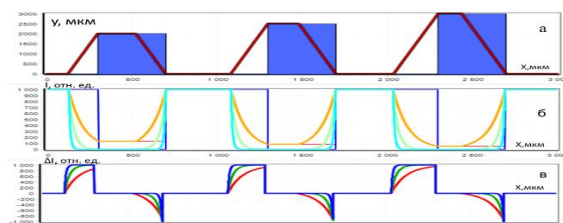


Рисунок 1 – Результаты расчетов программы «X-ray vox» для толщины 3000 мкм: зависимость толщины от координаты (а); распределение интенсивности на детекторе (б); результат дифференциальной съемки (в)

Распределение интенсивности на детекторе в зависимости от коэффициента поглощения объекта показаны на рисунке 1. Коэффициенты поглощения соответствуют разным материалам: C_3H_6 (*polypropylene*) – синяя линия, Cu (меди) – зеленая линия, $C_5O_2H_8$ (*plexiglass*) – красная линия. С увеличением линейного коэффициента поглощения растет контраст в изображении границ объектов (рисунок 1, б–в). При повороте пластинки наблюдается спад интенсивности, что может характеризоваться некоторым размытием изображения на детекторе.

Результат дифференциальной съемки ΔI с пиками, определяющими границы объекта показан на рисунке 1, в, где зеленая линия – медь, красная линия – плексиглас, синяя линия – полипропилен. Видно, что при повороте объекта результат дифференциальной съемки проявится на участках 150–300 мкм и 550–700 мкм, и зависимость яркости изображения будет иметь нелинейный характер. При увеличении линейного коэффициента поглощения увеличивается разностный контраст (рисунок 1). Результат дифференциальной съемки содержит положительную и отрицательную часть графика. Положительная часть ΔI соответствует светлым элементам изображения, а отрицательная – темным элементам. Наличие темных и светлых элементов увеличивает контраст изображения и характеризует границы объекта.

Разработана программа для моделирования сеток. Разработаны алгоритмы для моделирования и распознавания различных объектов. Алгоритм распознавания основан на анализе распределения активных пикселей детектора в сравнении с равномерным распределением плотности пикселей при равномерном засвечивании детектора.

На рисунке 2 изображены результаты моделирования и результаты экспериментального исследования полимерных сеток. Качественное сходство позволяет сделать вывод о возможности регистрировать параметры изображения, например, шаг сетки, толщина, ориентация в условиях экстремально малого числа фотонов на детекторе.

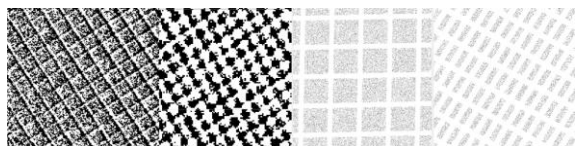


Рисунок 2 – Экспериментальные (1 и 2 слева) и расчетные (3, 4 справа) изображения решеток

Для получения стереоизображений в рентгеновском диапазоне использовался источник рентгеновских лучей в виде рентгеновской трубки с медным анодом, рабочее напряжение на аноде трубки 12 кВ, анодный ток – 2 мА, биннинг 2.

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.

Выполнены экспериментальные исследования сеток с поворотом для получения изображения в рентгеновских лучах. На рисунке 3, а–в (слева) показаны результаты вычитания изображений, при углах поворота на 2 градуса (а), на 4 градуса (б) и на 6 градусов (в). Расстояние от источника до объекта = 450 мм, а расстояние от объекта до камеры 15 мм. Видно, что при увеличении угла поворота, размер контрастного изображения возрастает.

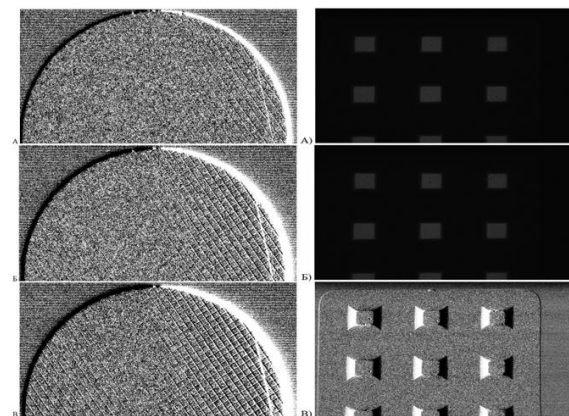


Рисунок 5 – Изображения объектов в рентгеновских лучах: сетка (слева), зонная пластинка (справа)

Также были выполнены экспериментальные исследования зонных пластинок с поворотом. На рисунке 3 (справа) показан результат, полученный вычитанием изображений, при угле поворота на 1 градус. Напряжение на аноде составляло 20 кВ, ток 2 мА, биннинг 1. Расстояние от источника до объекта = 600 мм, расстояние от объекта до камеры 10 мм.

Благодарности. Работа частично поддержана Министерством образования Республики Беларусь в рамках задания 3.07 ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», подпрограмма «Техническая диагностика».

Литература

1. 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.

UDC 530.122.1

GRAVITATIONAL WAVE DETECTION SYSTEMS BASED ON SATELLITE CONSTELLATIONS**Beglik V.V., Kolchevsky N.N., Ohrymenko I.P.***Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Currently, there are three observatories worldwide specialized in detecting gravitational waves, with 93 such events already recorded. In the field of space measurement technology, a new system designed for registering gravitational waves has been introduced, named "S-LIGO-NxR-zy". To analyze and calculate the kinematic characteristics of this system, specialized software has been developed using RAD Studio version 10.4.2 and programmed in the C# programming language. Furthermore, as part of the research, a detailed analysis of various satellite group configurations based on the use of planetary bodies as components has been conducted.

Key words: satellite systems, gravitational waves, satellite space detector.

СИСТЕМЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН НА ОСНОВЕ ГРУППИРОВОК СПУТНИКОВ**Беглик В.В., Кольчевский Н.Н., Охрименко И.П.***Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. На данный момент в мире функционируют три обсерватории, специализирующиеся на обнаружении гравитационных волн, и было зафиксировано уже 93 подобных событий. В сфере космической измерительной технологии представлена новая система, предназначенная для регистрации гравитационных волн, и она называется «S-LIGO-NxR-zy». Для анализа и расчета кинематических характеристик данной системы было создано специальное программное обеспечение, использующее среду разработки *RAD Studio* версии 10.4.2 и написанное на языке программирования *C#*. Кроме того, была проведена аналитика различных конфигураций группировок, основанных на использовании планетарных тел в качестве составных элементов.

Ключевые слова: спутниковые системы, гравитационные волны, космический детектор.

Address for correspondence: Kolchevsky N.N., Kurchatova str. 1–62, Minsk, 220045, Republic of Belarus.

e-mail: kolchevsky@bsu.by

Introduction

Since the discovery of gravitational waves in 2015 and the subsequent observation of many unique events such as black hole mergers and neutron stars, the scientific community has ushered in a new era of space exploration. However, accurately studying and analyzing these gravitational waves requires high-precision equipment and specialized instruments. Satellites offer distinct advantages in the detection and study of gravitational waves. Unlike terrestrial detectors, they are free from atmospheric and terrestrial influences, allowing them to operate at higher frequencies and with higher sensitivity. This opens up possibilities for registering new classes of gravitational events and accurately studying their characteristics.

Satellite systems for detecting gravitational waves

Several satellite system designs for gravitational waves are already in development and are planned for launch in the coming decades (figure 1). The best known of these include:

- LISA (Laser Interferometer Space Antenna): This is an ambitious international project being developed by the European Space Agency (ESA). It consists of three free-floating satellites forming a large-scale laser interferometer in space. LISA will be able to record gravitational waves in the low-frequency range and will allow the study of black hole and neutron star mergers in the far reaches of the universe;

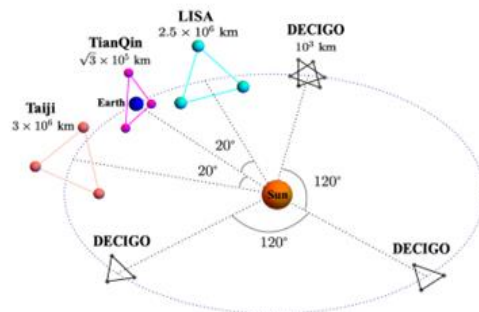


Figure 1 – Scheme of constellations of known space detectors of gravitational waves

- DECIGO (DECi-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory): This Japanese project aims to build a space-based system to detect gravitational waves in the decihertz (0.1 to 100 Hz) range. DECIGO will provide new data on gravitational waves, including their sources and origins;

- BBO (Big Bang Observer): BBO is a conceptual project considered as a potential future satellite to study gravitational waves associated with the early Universe. It may help us understand the origin of the universe and provide information about cosmological events;

- TianQin: This is a Chinese satellite project to detect gravitational waves. It aims to record black hole and neutron star mergers in the low-frequency range.

– Taiji: This is a Chinese space project to detect and study gravitational waves in space. The main goal of the Taiji project is to build a space system capable of detecting gravitational waves in the low-frequency range (0.01 to 0.1 Hz).

Modeling of gravitational detector satellite constellations

It is proposed to investigate the model of space detector of gravitational waves based on the configuration of satellites that use "Platonic bodies" as their basis. A space-based GW measurement system of x satellites with the conventional designation "S-LIGO-NxR-zy" Space – Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) is proposed, where X is the number of satellites of Z type of orbit (low-orbit – L, medium-orbit – M, geostationary – G, highly elliptical – H-orbits, Z – does not depend on the type) located on Y – the number of orbits of the planet of name N (planet Earth – E).

The temporal spatial evolution and capabilities of the space HW detector with a system of satellites located in geostationary orbits are investigated (figure 2). We consider 6 configurations of satellites, which periodically form regular polyhedrons in space

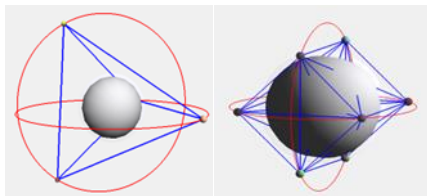


Figure 2 – Software interface and schematic of the satellite constellations of the proposed detector

The spatial configurations of space systems can be specified in many ways, depending on the choice of the number of orbits and the variation of the dependent placement of satellites in these orbits. In general, it is possible to have different numbers of satellites, denoted as N , and hence the system can be organized into different polygonal configurations. This is an area that requires further research and investigation. In addition, the satellites can be in different orbits and have different orbital characteristics. In such a situation, a space object monitoring system capable of detecting and determining the orbital parameters of these objects makes it possible to deploy a space gravitational wave detector or a system of satellites, even if their orbits and kinematic parameters are diverse and undefined. The tool used to develop Taraxacum's software was the Unity engine, similar to the engine used to create computer games. In this program, the user can set and control the following parameters: satellite assignment, calculating satellite coordinates, setting satellite direction, altitude and other important

parameters, plotting satellite system motion graphs, 3D modeling of satellites, Import/export satellite configurations, video recording capability (figure 3).

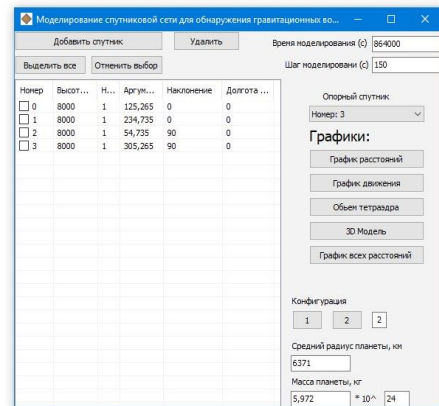


Figure 3 – Software interface

Conclusion

Satellite systems for observing gravitational waves offer several advantages, including freedom from atmospheric and terrestrial influences. Several major projects, such as LISA, DECIGO, and BBO, are in development and planned for launch in the coming decades. These projects will provide a unique opportunity to explore gravitational waves of different frequency ranges and will reveal new aspects of the nature of the universe.

We have developed a separate system for space detection of GWs based on a system of satellites. We have proposed a space measurement system of N satellites with the conventional designation "S-LIGO-NxR-zy", where X is the number of satellites of Z type of orbit (low-orbit – L, medium-orbit – M, geostationary – G, highly elliptical – H-orbit, Z – does not depend on the type), located on Y – the number of orbits of the planet of the name N (planet Earth – E).

Software has been developed that allows to set different initial configurations of satellite systems and to study their mutual position over time with a visualization function, which is important for building a near-Earth gravity detector and other research systems based on a constellation of satellites.

References

1. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole / B.P. Abbot [et al.] // Merger Phys. Rev. Let. – 2016. – Vol. 116, iss. 6. – P. 061102.
2. Poincare, H. Sur la dynamique de l'électron / H. Poincare // Rend. Circ. Mat. Palermo. – 1906. – Vol. 21, ser. 1. – P. 129–176.
3. Weber, J. Gravitational-wave-detector events / J. Weber // Physical Review Letters. – 1968. – Vol. 20, iss. 23. – P. 1307.

УДК 543.42:678.664

СПЕКТРАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ КАТИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И ФЕНОЛКАРБОНОВЫХ КИСЛОТ**Бобкова Е.Ю., Василевская Л.Н., Гавриленко О.О., Ксенофонов М.А., Шкредова Н.А.***НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Разработаны оптические методики определения концентрации карбоновых кислот и солей тяжелых металлов в водных растворах после сорбции их пенополиуретановым сорбентом в статических и динамических условиях эксперимента. Установленные методики позволили сделать выводы о бифункциональной способности сорбента к извлечению неполярных и полярных соединений.

Ключевые слова: измерения, оптические методы, сорбция, карбоновые кислоты, тяжелые металлы.

SPECTRAL METHODS FOR MEASURING THE CONCENTRATION OF HEAVY METALS CATIONS AND PHENOLCARBOXYLIC ACIDS DURING SORPTION**Bobkova E.Yu., Vasilevskaya L.N., Gavrilenko O.O., Ksenofontov M.A., Shkredova N.A.***A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of BSU
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Optical methods have been developed for determining the concentration of carboxylic acids and heavy metal salts in aqueous solutions after their sorption by polyurethane foam sorbent under static and dynamic experimental conditions. The established methods allowed to draw conclusions about the bifunctional ability of the sorbent to extract non-polar and polar compounds.

Key words: measurements, optical methods, sorption, carboxylic acids, heavy metals.

Адрес для переписки: Бобкова Е.Ю., ул. Курчатова, 7, г. Минск, 220045, Республика Беларусь
e-mail: lab_dozatof@mail.ru

Современные химические методы структурного анализа полиуретановых композитов являются длительными, трудоемкими, а зачастую требуют проведения сложных и дорогостоящих экспериментальных исследований. Для решения подобного рода задач на первый план выходят методы колебательной спектроскопии в сочетании с компьютерной графикой и привлечением способов математического моделирования, базирующиеся на квантово-химических представлениях и теории колебаний молекул.

Разработаны методики определения концентрации фенолкарбоновых кислот и солей тяжелых металлов в водных растворах после сорбции их пенополиуретановым сорбентом на основании измерения оптической плотности с предварительным построением калибровочных кривых. Оптическую плотность водных растворов измеряли на спектрофотометре СФ-26. Значения рН растворов контролировали на рН-метре рН-121.

Сорбцию фенолкарбоновых кислот проводили из водных растворов в пределах концентрации 0,01–0,05 г/л ($1 \cdot 10^{-3}$ М/л) в статических условиях при комнатной температуре (17–25 °С). Для повышения растворимости в навеску с фенолкарбоновой кислотой добавляли ~1 мл этилового спирта.

Сорбцию солей тяжелых металлов $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ исследовали в статических (рисунок 1) и динамических (рисунок 2) условиях (объем колонки – 180 см³, высота слоя сорбента – 15 см, насыпной вес –

14 кг/м³) в диапазоне начальных концентраций 1,25–10,00 г/л при комнатной температуре.

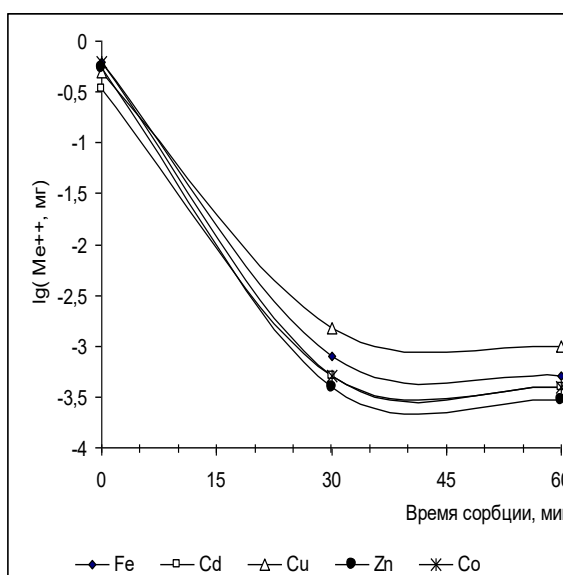


Рисунок 1 – Кинетика сорбции катионов металлов из водного раствора солей

Оптическую плотность измеряли по интенсивным полосам поглощения: Co^{2+} при 300 нм, Ni^{2+} – 395 нм и Cu^{2+} – 800 нм. Отбор проб для спектрального анализа осуществляли через 15, 30, 45, 60 мин. Концентрацию катионов тяжелых металлов определяли по калибровочным графикам $D = f(c)$.

Эффективность сорбента оценивали по значению сорбционной емкости, времени достижения сорбционного равновесия и степени извлечения.

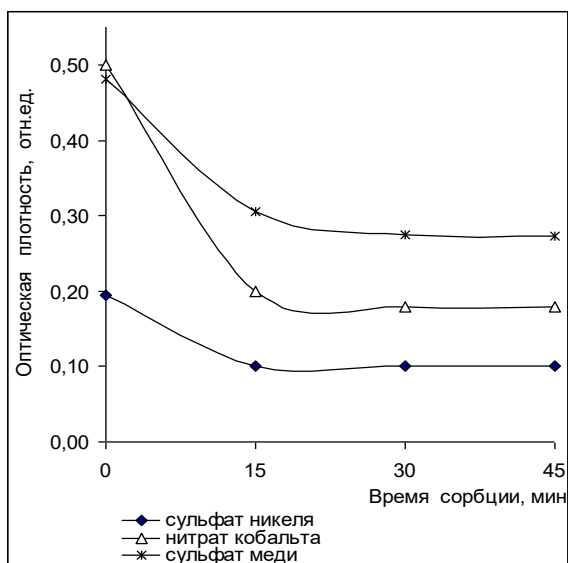


Рисунок 2 – Кинетика сорбции катионов Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} при концентрации их солей 10,0 г/л

Разработанные методики позволили установить следующие закономерности:

- пенополиуретан сорбирует фенолкарбоновые кислоты в молекулярной форме. Основной тип взаимодействий сорбент – сорбат гидрофобный, а механизм сорбции – экстракционный;

- пенополиуретан сорбирует из водных растворов катионы Cd^{2+} , Co^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , сорбция в динамических условиях завершается через 15 минут. При увеличении исходной концентрации катионов (1,25–10,00 г/л) в 8 раз сорбционная емкость растет ~ в 13–14 раз, а степень поглощения – в 1,8 раз;

- сорбция в статическом режиме и низких концентрациях катионов (0,01 % масс.) завершается через 60 мин, степень поглощения составляет 94–98 %, а сорбционная емкость 18,8–19,6 мг/г;

- изотермы сорбции в диапазоне исследованных концентраций носят линейный характер (рисунок 3).

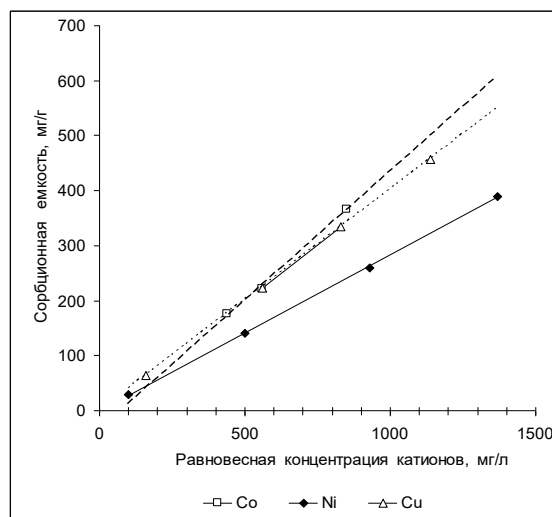


Рисунок 3 – Изотермы сорбции катионов Ni^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} при исходной концентрации 250–2550 мг/л

Полученные результаты свидетельствуют о высоких равновесно-кинетических свойствах пенополиуретанового сорбента. Методики могут быть использованы для определения сорбционной емкости и степени извлечения тяжелых металлов из водных растворов.

Сорбционные свойства полимерных материалов в значительной степени обусловлены их ячеистой, мембраноподобной структурой, обеспечивающей доступ сорбируемых молекул внутрь сорбента, а также сочетанием разнообразных гидрофильных и гидрофобных активных центров и реакционноспособных концевых групп.

Таким образом, разработанные методики позволили установить, что исследуемый пенополиуретан является бифункциональным сорбентом, который способен извлекать из водных сред как неполярные вещества (нефтепродукты и другие гидрофобные углеводороды) за счет гидрофобного взаимодействия, так и полярные соединения (катионы солей тяжелых металлов). При этом возможно взаимодействие катионов с функциональными группами полимера через образование координационных связей. Последнее предположение требует дополнительных исследований экспериментальными и теоретическими спектральными методами.

УДК 65.012.61

ПРОБЛЕМЫ ВНУТРЕННИХ КОММУНИКАЦИЙ В СИСТЕМАХ МЕНЕДЖМЕНТА

Гуринович А.А., Давыдова Е.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В современных организациях наблюдается множество проблем в процессах внутренних коммуникаций, таких как искажение информации, непонимание сотрудниками важности каждой отдельной функции, задержки и/или невыполнение целых процессов. Однако зачастую реальное воплощение декларируемых этими организациями принципов коммуникации не производится, а все внимание акцентируется лишь на внешних атрибутах корпоративной культуры. Одним из вариантов разрешения проблем коммуникации выступает стратегия формирования единого информационного пространства, а также совершенствование процессов коммуникаций с разработкой новых подходов и методов.

Ключевые слова: внутренние коммуникации, системы менеджмента, совершенствование процессов коммуникаций.

PROBLEMS OF COMMUNICATIONS IN MANAGEMENT SYSTEMS

Hurynovich A., Davidova E.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. There are many problems in internal communications processes in modern organizations, such as distortion of information, lack of understanding by employees of the importance of their responsibilities, delays and/or failure of entire processes. However, often the actual implementation of the communication principles declared by these organizations is not carried out, and all attention is focused only on the external attributes of corporate culture. One option for resolving communication problems is the strategy of creating a unified information space, as well as improving communication processes by developing new approaches and methods.

Key words: internal communications, management systems, improvement of communication processes.

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

Вне зависимости от того, к какому именно типу принадлежит та или иная организация, необходимым условием ее существования является координация совместной деятельности работников для достижения поставленных целей. Это требует хорошо отлаженной системы приема, передачи и переработки информации. Для того чтобы управленческие мероприятия были эффективными, а результат деятельности соответствовал ожиданиям, необходима развитая система коммуникаций, обеспечивающая синхронность и точность понимания передаваемого [1].

Термин «коммуникация» происходит от лат. «*communis*» – общее: передающий информацию пытается установить «общность» с получающим информацию. Основные различия коммуникаций заключаются в их структурных и процессуальных характеристиках [2].

В социальном контексте коммуникации определяются как процесс обмена информацией и передачи сведений между двумя людьми или в группе людей. Коммуникации – это важнейшее связующее звено между руководителем и его подчиненными, между руководителями одного уровня, между всеми сотрудниками организации, между организацией и внешней средой [3].

Коммуникация и сопутствующие ей процессы попали в поле зрения различных наук довольно давно. Главный редактор Международной энциклопедии по коммуникации Э. Барнум считает, что

коммуникации занимают одно из центральных мест в истории человечества, это объясняет то, что многие дисциплины (социология, лингвистика, психология, история, журналистика и пр.) стремятся к объяснению процесса коммуникации [4].

Теории, уделяющие ведущее значение качественным внутренним коммуникациям, в современности пользуются большой популярностью и на практике оказываются действенной, чем другие. Внутренняя коммуникация состоит из потока информации интеллектуального или эмоционального содержания, целью которого стоит ослабление негативных моментов во взаимоотношениях руководства и служащих и усиление/поддержание позитивных. Внутренние коммуникации позволяют устанавливать добропорядочные отношения между сотрудниками, между сотрудниками и администрацией/руководителем, кроме этого, они способствуют обеспечению условий эффективного и эмоционального соучастия и благоприятного климата в коллективе [5]. Больших успехов в налаживании внутренних коммуникаций в свое время добились США и Япония. Еще в середине ушедшего XX века один из основателей японской компании «Сони», один из ведущих мировых производителей электроники, видеотехники и лазерных технологий, Акио Морита говорил: «Никакая теория, программа или правительственная политика не могут сделать предприятие успешным, это могут сделать только

люди». С этим согласились многие ведущие страны мира: США, Япония, Германия, Франция, Великобритания [6; 7].

Сегодня в нашей стране для повышения эффективности деятельности организаций активно внедряются и функционируют системы менеджмента, в которых ключевым ресурсом является персонал предприятия.

Однако, многие компании сталкиваются с проблемой внутренних коммуникаций в связи с тем, что реальное воплощение декларированных ими принципов не производится, а все внимание акцентируется лишь на внешних атрибутах корпоративной культуры: фирменной одежде, логотипах и девизах. При этом реализация современных тенденций, таких как создание миссий организации, корпоративных ценностей, идут в разрез с общей реальной ситуацией внутри организации [5].

Актуальность выбранной темы исследования обусловлена тем, что в современных организациях формированию системы внутренних коммуникаций не уделяется должного внимания. Как правило, она формируется стихийно, отсюда возникает множество проблем как с коммуникациями в организации, так и со всеми взаимосвязанными с ней процессами. Например, если не налажены каналы коммуникаций, то информация будет искажаться, задерживаться, а, возможно, и вообще не доходить до получателя. Если сообщение (приказ или распоряжение), сформулировано непонятно для исполнителя, то он не сможет его выполнить. В случае, когда нет четких указаний, кто должен выполнять приказ (то есть, кто является исполнителем), могут возникнуть задержки, так как работники будут искать того, кто будет выполнять и нести ответственность за результат перед руководством [8].

В промышленной среде уделяется больше внимание внешним коммуникациям (связи с общественностью, коммуникации с потребителями, заказчиками и поставщиками), а процесс изучения и налаживания внутренних коммуникаций уходит на второй план: например, начинается с анкетирования сотрудников и редко доходит до каких-то последующих действий.

Основные способы совершенствования внутренних коммуникаций были определены еще классиками менеджмента и до сих пор остаются актуальными:

- регулирование информационных потоков со стороны руководства;
- осуществление управленческих действий со стороны руководителя: встречи-совещания, контроль запланированных работ и др.;
- организация систем обратной связи;
- системы сбора предложений;
- информационные бюллетени [9].

Одним из вариантов разрешения проблем коммуникации выступает стратегия формирования

единого информационного пространства, которая несет в себе: устранение разрывов в коммуникации как по горизонтали, так и по вертикали власти, что повышает уровень взаимопонимания; ведение диалога с персоналом организации (мнение каждого работника должно доходить до вышестоящих сотрудников, учитываться, а также сотруднику важно иметь инструменты для донесения этого мнения и оперативного получения обратной связи); готовность руководителей к диалогу; обучение политики корпорации в сфере обучения и развития персонала; организация общих стандартов поведения в соответствии с корпоративным кодексом и этикой компании [5].

Важность совершенствования процессов коммуникаций неоспорима. Возможность и целесообразность совершения действий в данном направлении зависит от размеров, экономических возможностей и внутренней культуры организации. На отечественных предприятиях при выборе вектора действия в независимости от выбранного метода, авторы полагают важным принять во внимание аспекты менталитета белорусов, культурные особенности и национальные традиции нашей страны.

Реализация совершенствования может быть различного масштаба: от подготовки специалистов в СМК, чья компетенция включает навыки межличностных отношений до разработки методов и подходов для совершенствования коммуникаций в рамках функционирования СМК в организациях.

Литература

1. Сафина, А.А. Коммуникационный менеджмент : уч. пособие / А.А. Сафина, Э.Г. Никифорова, А.Э. Устинов. – Казань : Изд-во Казанского ун-та. – 2015. – 104 с.
2. Викулова Л.Г. Основы теории коммуникации : практикум / Л.Г. Викулова, А. И. Шарунов. – М. : АСТ, 2008. – 316, [4] с.
3. Ивановская, Л.В. Кадровая политика и стратегия управления персоналом : уч.-методич. пособие / Л.В. Ивановская. – М. : Проспект. – 2016. – С. 54.
4. Тихомирова, Е.И. Наука о коммуникации: к объему понятия / Е.И. Тихомирова // Вестник Челябинского гос. унив. – 2016. – № 9 (391). – С. 166–171.
5. Журавлева, А.С. Проблемы внутренней коммуникации в организации / А.С. Журавлева // Молодой ученый. – 2020. – № 47 (337). – С. 119–121.
6. Гнатюк, О. Л. Основы теории коммуникации (для бакалавров) / О.Л. Гнатюк. – М. : КноРус, 2015. – 128 с.
7. Гойхман, О.Я. Основы теории коммуникации: Учебное пособие / О.Я. Гойхман, Л.М. Гончарова, В.И. Дубинский. – М. : Инфра-М, 2018. – 253 с.
8. Перкова, Е.П. Система внутренних коммуникаций промышленного предприятия / Е.П. Перкова // Современные тенденции в экономике и управлении: новый взгляд. – 2015. – № 37–1. – С. 60–71.
9. Ивашова, В.А. Исследование внутренних коммуникаций в организации / В.А. Ивашова, Ю.Б. Надточий // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 6–3 (108). – С. 181–185.

УДК 371.3

ОСОБЕННОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА В УСЛОВИЯХ КАСТОМИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Дирша А.В., Соломахо В.Л.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Современная индустрия стремится к инновациям и гибкости, что приводит к распространению кастомизированного производства. Этот подход предполагает адаптацию массового продукта под запросы конкретного потребителя и основывается на модульном принципе организации производства товаров и услуг. Однако, с увеличением сложности и гибкости производства, возникают новые задачи, связанные с обеспечением качества продукции. Учитывая, что обеспечение качества широкое понятие, включающее в себя целый ряд направлений, в данной статье рассмотрим методы обеспечения качества продукции с основным фокусом на метрологическом обеспечении качества.

Ключевые слова: кастомизированное производство, искусственный интеллект, контрольно-измерительные машины, групповой подход.

FEATURES OF METROLOGICAL QUALITY ASSURANCE IN CUSTOMIZED PRODUCTION CONDITIONS

Dirsha A.V., Solomakho V.L.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Modern industry strives for innovation and flexibility, which leads to the spread of customized production. This approach involves adapting a mass product according to consumer demand and is based on the modular principle of organizing the production of goods and services. However, given the complexity and flexibility of production, new challenges arise related to ensuring product quality. Given that quality assurance is a broad concept that includes a number of areas, this article discusses methods for ensuring product quality with a main focus on metrological quality indicators.

Keywords: customized production, artificial intelligence, control and measuring machines, group approach.

Адрес для переписки: anton.dirsha@gmail.com

В условиях серийного производства изделий всегда существуют отработанные технологические карты и методики проверки контрольных параметров. Кастомизированное производство продукции отличается от массового и серийного частой сменой выпускаемых изделий, так же возможны существенные различия деталей конструкции однотипового назначения. К сложностям разработки комплекса модифицированных конструкций добавляются сложности создания новых технологических процессов и процессовых метрологического обеспечения, в условиях ограниченных сроков выполнения изделий.

Традиционное решение данной проблемы включает в себя разработку индивидуального метрологического обеспечения для каждого нового контрольного параметра. Что влечет за собой существенное увеличение себестоимости выпущенной продукции, а также затраты интеллектуальных ресурсов и времени на разработку дополнительного оборудования.

В настоящее время наблюдаются две стратегии решения вопроса метрологического обеспечения кастомизированного производства:

– универсальный подход, заключающийся в создании контрольно-измерительных систем на базе контрольно-измерительных машин (КИМ),

обладающих элементами искусственного интеллекта и способностью самообучения [1–3];

– групповой подход, предполагающий кластеризацию объектов контроля по назначению, структуре, параметрам контроля и т. д. [4] (рисунки 1).

Первый подход очевидно реализуем при условии, что объектами контроля являются геометрические параметры изделий. Наличие КИМ и практическое применение компьютерных технологий, направленных на создание систем, которые обучаются и развиваются на основе получаемых ими в процессе эксплуатации данных представляется достаточно перспективным. Использование производственной базы данных для развития «искусственного интеллекта», со временем, позволит ускорить выполнение типовых контрольно-измерительных операций, снизить нагрузку на оператора контрольно-измерительной машины, повысить качество проводимых измерений и свести к минимуму участие человека в процессе проверки параметров.

К недостаткам такого подхода в настоящий момент можно отнести:

– сложность распространения (пока только геометрические параметры);
– высокую стоимость реализации;



Рисунок 1 – Групповой подход

– большую долю интеллектуального труда, необходимого для реализации подхода и, соответственно, высокую квалификацию персонала.

В основе второго подхода положена кластеризация контрольно-измерительных процедур с целью их группирования и создания универсальных комплексов оборудования в пределах классификационных групп. Второй подход, в настоящих условиях, представляется более универсальным и менее затратным, имея ввиду наличие контрольно-измерительного оборудования и персонала необходимой квалификации.

Реализация второго пути предполагает выполнение следующих процедур:

- классификацию и анализ требований предъявляемых к продукции;
- выявление источников несоответствий, на основе статистического анализа поступающих на ремонт изделий;

- определение критериев качества для каждого конкретного источника несоответствий;
- разработку систем контроля качества на основе выделенных критериев;
- разработку методик контроля и испытаний продукции;
- разработку методик поверки контрольно-испытательного оборудования.

Литература

1. Марушкин, М. Некоторые проблемы современной метрологии в микроэлектронике / М. Марушкин, В. Мартынов // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2020. – № 2. – С. 80–91.
2. Розяева, Т.Н. Качество 4.0: сущность, основные элементы, возможности от реализации [Электронный ресурс] / Т.Н. Розяева // КиберЛелинка – Научная электронная библиотека. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-podhody-k-primeneniyu-kontseptsii-kachestvo-4-0-na-predpriyatiyah/viewer>.
3. Соломахо, В.Л. Повышение эффективности функционирования сложных технических систем на основе технологий нейронных сетей / В.Л. Соломахо, Н.Г. Денисов // Сборник МНТК «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки». – Минск : БНТУ. – 2019. – С. 156–158.
4. Соломахо, В.Л. Обеспечение качества сопрягаемых поверхностей деталей / В.Л. Соломахо, Б.В. Цитович // Журнал «Инженер-механик». – 2020. – № 3. – С. 30–32.

УДК 531.768

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ КАЛИБРОВКЕ АКСЕЛЕРОМЕТРА

Дубейко С.В., Коробко Ю., С. Сенюта В.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Описана методика оценивания неопределенности измерений при калибровке акселерометра, применяемого при испытаниях специальных покрытий, которые используются при строительстве детских и спортивно-игровых площадок. Построен алгоритм измерения ускорения при калибровке. Выявлены источники неопределенности, построена причинно-следственная диаграмма (диаграмма К. Исикавы).

Ключевые слова: акселерометр, виброускорение, измерение, калибровка, методика, неопределенность, алгоритм измерения, причинно-следственная диаграмма, источник неопределенности.

METHODOLOGY FOR ASSESSING UNCERTAINTY MEASUREMENTS DURING CALIBRATION ACCELEROMETER

Dubeyko S.V., Korobko Yu.S., Senyuta V.V.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A method for estimating measurement uncertainty when calibrating an accelerometer used in testing special coatings that are used in the construction of children's and sports playgrounds is described. An algorithm for measuring acceleration during calibration has been constructed. Sources of uncertainty were identified and a cause-and-effect diagram was constructed (K. Ishikawa's diagram).

Key words: accelerometer, vibration acceleration, measurement, calibration, methodology, uncertainty, measurement algorithm, cause-and-effect diagram, source of uncertainty.

Адрес для переписки: Коробко Ю.С., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: korobko.u@bntu.by

Акселерометры предназначены для измерения ускорения, т. е. скорости изменения скорости, которую он испытывает относительно сво-

бодного падения. Их применяют при оценке ударов, вибраций, резкого увеличения или уменьшения скорости, силы и т. п. В предлагае-

мой работе рассматривается вариант использования акселерометра при испытаниях специальных покрытий, используемых при строительстве детских и спортивно-игровых площадок.

Государственное регулирование в отношении детских площадок и покрытий осуществляется в соответствии с ТР ТС 042/2017 [1]. Основные требования к ним изложены в ГОСТ 34614.1-2019 [2]. Согласно этим документам, применяемое покрытие должно в приемлемой мере поглощать удар при непреднамеренном падении человека, что требует уделять надлежащее внимание выбору и установке безопасных покрытий на спортивно-игровых и детских площадках, а также проводить регулярные проверки и обслуживание, чтобы обеспечить посетителям безопасное и комфортное пространство для игр и тренировок.

Согласно Постановления № 38 [3] методика калибровки акселерометров, предназначенных для испытаний специальных покрытий детских и спортивно-игровых площадок на ударное воздействие, предполагает помимо других процедур, обработку результатов измерений, в частности оценивание неопределенности измерений при калибровке. В докладе предлагается оригинальная методика оценивания неопределенности измерений. Суть этой методики заключается в том, что погрешность измерения ускорения определяют, как отклонение действительного измеренного значения, полученного с помощью испытательного модуля от эталонного, полученного с помощью виброустановки. Алгоритм измерения ускорения при калибровке приведен на рисунке 1.

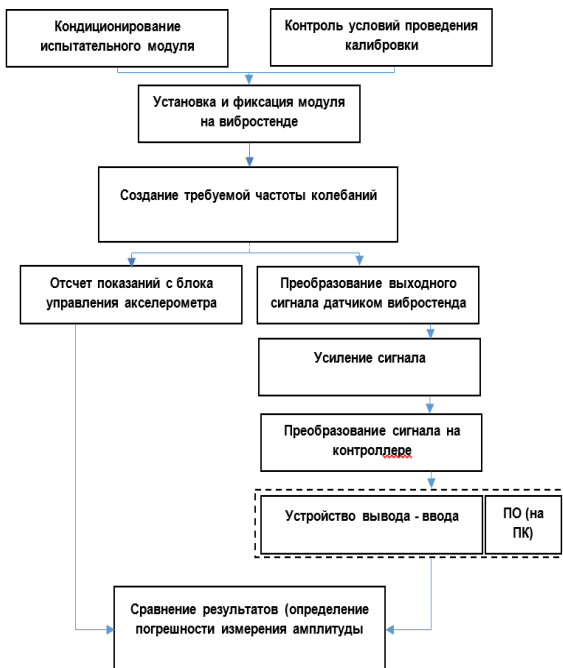


Рисунок 1 – Алгоритм измерения ускорения при калибровке

При калибровке в качестве выходной величины принимается погрешность измерения ускорения Δa , которая определяется по формуле (1).

$$\Delta a = |a_{\text{эт}} - a_{\text{изм.}}|, \quad (1)$$

где $a_{\text{эт}}$ – ускорение, полученное с помощью виброустановки; $a_{\text{изм.}}$ – ускорение, полученное с помощью испытательного модуля.

Источники неопределенности выявлялись «методом мозгового штурма» с привлечением 3-х экспертов лаборатории. Для иллюстрации и структуризации выявленных источников возникновения неопределенности была использована причинно-следственная диаграмма (диаграмма К. Исикавы), представленная на рисунке 2.

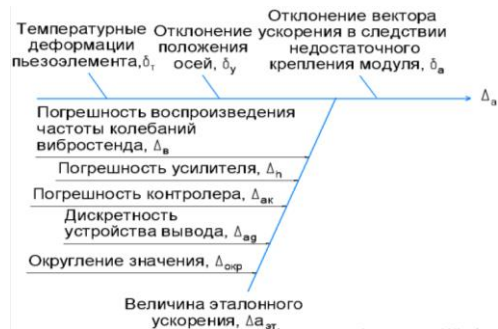


Рисунок 2 – Источники возникновения неопределенности при измерении ускорения при калибровке: δ_{τ} – температурные деформации пьезоэлемента; Δ_y – отклонение положения осей; δ_{α} – отклонение вектора ускорения вследствие недостаточного крепления модуля; Δ_B – погрешность воспроизведения амплитуды/частоты колебаний вибростенда

Согласно эксплуатационной документации $\Delta_B = \pm 0,05$. Неопределенность, связанная с погрешностью воспроизведения амплитуды/частоты колебаний вибростенда, принимаем равной (2):

$$u(\Delta_B) = \frac{\Delta_B}{\sqrt{3}}, \quad (2)$$

где Δ_h – погрешность усилителя, определяемая как $\Delta_h = \pm 0,01$. Неопределенность, связанная с погрешностью усилителя, принимаем равной (3):

$$u(\Delta_h) = \frac{\Delta_h}{\sqrt{3}}, \quad (3)$$

где $\Delta_{\text{ак}}$ – погрешность контроллера, согласно эксплуатационной документации $\Delta_{\text{ак}} = \pm 0,5$.

Неопределенности, связанная с погрешностью контроллера будет равна (4):

$$u(\Delta_{\text{ак}}) = \frac{\Delta_{\text{ак}}}{\sqrt{3}}, \quad (4)$$

где $\Delta_{\text{ад}}$ – дискретностью устройства. Неопределенности, связанная с дискретностью устройства будет равна (5):

$$u(\Delta_{\text{ад}}) = \frac{0,5 \cdot \text{наим. разряд кода}}{2\sqrt{3}}, \quad (5)$$

где Δ_0 – погрешность округления результата единичного определения ускорения. Неопределенность, обусловленная округлением единичного значения, будет определяться как (6):

$$u(\Delta_0) = \frac{0,5}{2\sqrt{3}} \quad (6)$$

Все входные величины рассматриваются как некоррелированные, поскольку получены независимо друг от друга на разных этапах методики калибровки.

Суммарная стандартная неопределенность величины изменения ускорения определяется как:

$$(\Delta_a) = \sqrt{(C_1 \cdot u(\Delta_n))^2 + (C_2 \cdot u(\Delta_h))^2 + (C_3 \cdot u(\Delta_{ак}))^2 + (C_4 \cdot u(\Delta_{ад}))^2 + (C_5 \cdot u(\Delta_0))^2} \quad (7)$$

где $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = 1$ – коэффициенты влияния соответствующих составляющих неопределенности.

В качестве примера в таблице 1 приведен бюджет неопределенности, полученный для акселерометра (Model 356A02).

Таблице 1. Бюджет неопределенности

Параметр	Значение параметра	Стандартная неопределенность, $u(x_i)$	Коэффициент чувствительности, C_i	Вклад в неопределенность, $C_i \cdot u(x_i)$
Δ_n	0,05	0,03	1	0,03
Δ_h	0,01	0,006	1	0,006
$\Delta_{ак}$	0,5	0,005	1	0,005
$\Delta_{ад}$	0,05	0,00014	1	0,00014
Δ_0	0,5	0,0014	1	0,0014
Δ_a	$ a_{ст} - a_{изм} $	0,03		

Оценку расширенной неопределенности можно рассчитать для уровня доверия 95 % в предположении нормального закона распределения оцениваемой величины. Коэффициент охвата k принимается равным 2 (8).

$$U(\Delta_a) = u(\Delta_a) \cdot k. \quad (8)$$

Литература

1. О безопасности оборудования для детских игровых площадок : ТР ТС 042/2017.
2. Оборудование и покрытия игровых площадок. Часть 1. Общие требования безопасности и методы испытаний : ГОСТ 34614.1-2019.
3. Об осуществлении метрологической оценки для утверждения типа средств измерений и стандартных образцов: Постановление Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь от 20 апреля 2021 г. № 38.

УДК 53.089.6

МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТЬ КАЛИБРОВКИ АКСЕЛЕРОМЕТРА (МОДУЛЯ УСТРОЙСТВА TRIAX 2015)

Дубейко С.В., Коробко Ю.С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены актуальные вопросы обеспечения единства измерений при калибровке средств измерения виброускорения – установление метрологическая прослеживаемости. Предложена схема метрологической прослеживаемости, разработана методика его калибровки и методика оценивания неопределенности измерений акселерометра (модуля устройства TRIAX 2015).

Ключевые слова: акселерометр, виброускорение, измерение, калибровка, метод калибровки, метрологическая прослеживаемость.

ESTABLISHMENT OF METROLOGICAL TRACEABILITY WHEN CALIBRATING THE ACCELEROMETER (TRIAx 2015 DEVICE MODULE)

Dubeyko S.V., Korobko Yu.S.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Topical issues of ensuring the uniformity of measurements during calibration of vibration acceleration measuring instruments – the establishment of metrological traceability are considered. A metrological traceability scheme was proposed and, based on it, a calibration technique and a method for estimating the uncertainty of the accelerometer (TRIAx 2015 device module) were developed.

Key words: accelerometer, vibration acceleration, measurement, calibration, calibration method, metrological traceability.

Адрес для переписки: Коробко Ю.С., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: korobko.u@bntu.by

Понятие «метрологическая прослеживаемость» на законодательном уровне в Республике Беларусь установлено законом Республики Бела-

русью «Об обеспечении единства измерений». Метрологическая прослеживаемость – свойства результата измерений, в соответствии с которым

этот результат может быть соотнесен с национальным эталоном единицы величины или иной основой для сравнения через документированную неразрывную цепь поверок средств измерений и/или калибровок.

Метрологическая прослеживаемость обеспечивает связь между результатом измерения или значением эталона и соответствующим опорным значением на более высоких уровнях. Метрологическая прослеживаемость может быть обеспечена различными способами, но часто она осуществляется путем обеспечения неразрывной цепи калибровок, которая приводит к международному или национальному эталону, где на каждом этапе цепи должна быть оценена и задокументирована неопределенность результата калибровки. В свою очередь методика калибровки на каждом этапе цепи должна опираться на утвержденные стандарты и методики. Лаборатории, осуществляющие калибровки, должны быть аккредитованы на техническую компетентность и должен быть выдержан межкалибровочный интервал [1–3].

Устройство, рассмотренное в данной статье, используется с целью обеспечения безопасности детей на игровых площадках, в частности в отношении повреждений головы ребенка, получаемых при падении с игрового оборудования. Такие повреждения характеризуются наиболее тяжелыми последствиями [4–5].

Детские площадки являются важной частью жизни детей, которые играют на них, взаимодействуют друг с другом и развивают навыки, такие как социальная и физическая активность, творчество и воображение. Эти навыки и опыт, полученный на детских площадках, являются необходимыми для полноценного развития детей. Кроме того, следует отметить, что детские площадки могут оказывать положительное влияние на развитие родительских компетенций. Родители, которые активно взаимодействуют со своими детьми на детских площадках, улучшают свои социальные навыки и развивают более глубокие и продуктивные отношения [6].

Несмотря на это, многие детские площадки имеют свои проблемы, которые могут привести к травмам и неудачам. Некачественные материалы, устаревшее оборудование, плохое состояние покрытий и другие факторы могут представлять угрозу для безопасности детей. Поэтому необходимо обеспечить высокий уровень качества и безопасности детских площадок. Как следствие наблюдается необходимость контроля покрытий игровых площадок.

TRIAХ 2015 позволяет оценивать различные покрытия игровых площадок на способность смягчать удар при падении в зоне приземления оборудования игровой площадки. Модуль в свою очередь является основным элементом устройства и имеет алюминиевый корпус, внутри

которого установлен трехосный акселерометр модели 356A02 ICP® Triaxial Accelerometer, производства PCB Piezotronics [7].

В предлагаемой работе показано, что для установления метрологической прослеживаемости при калибровке акселерометра (модуля TRIAX 2015 беспроводного устройства для определения уровня ударного воздействия) за основу была принята государственная поверочная схема для средств измерений виброускорения, которая приведена в МИ 2070-90. Схема отображает иерархию средств измерения виброускорения и нормирует на каждом этапе передачи размера конкретные средства измерений (СИ), допустимые погрешности СИ и методы поверки. На основе поверочной схемы была разработана и предложена схема метрологической прослеживаемости при калибровке акселерометра, которая показана на рисунке 1.

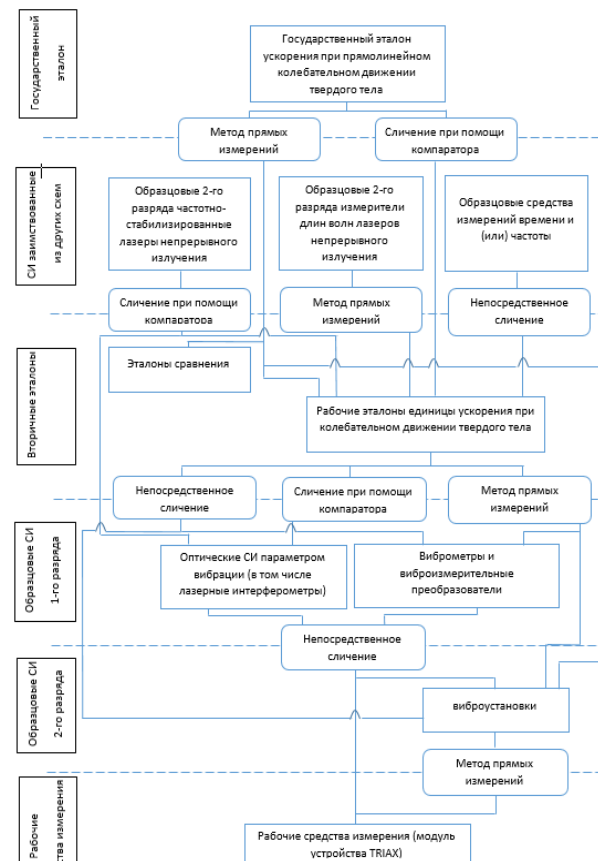


Рисунок 1 – Упрощенная схема передачи единицы виброускорения

Кроме того, в целях реализации этапа передачи единицы величины виброускорения от рабочего средства измерения к эталонному средству измерения 2-го разряда были разработаны и предложены методика калибровки и методика оценивания неопределенности измерений акселерометра. При этом методика калибровки разработана в со-

ответствии с требованиями Постановления Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь от 20 апреля 2021 г. № 42 «Об утверждении правил осуществления метрологической оценки в виде работ по калибровке средств измерений» и с учетом требований ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий».

В качестве основы для сравнения при калибровке акселерометра (модуля TRIAX 2015) использовалось следующее оборудование: виброустановка МРА403-М124М (частотный диапазон от 5 Гц до 4000 Гц, максимальное перемещение 51 мм, пиковая скорость 1,8 м/с, пиковое ускорение 200 g, подвижная масса до 10 кг, усилитель мощности 13 кВА). Выбор виброустановки как основы для сравнения был обусловлен конструкцией (полусферическая форма) и массой самого модуля (масса 4,6 кг).

Дальнейшие этапы цепи калибровок проводятся в соответствии с приведенной на рисунке 1 схемой.

Литература

1. Velichko, O.N. Traceability of measurement results at different levels of metrological work / O.N. Velichko // Measurement Techniques. – 2009. – 52 (11). – P. 1242–1248.
2. Метрологическая прослеживаемость результатов испытаний / В.Г. Кутяйкин [и др.] // Компетентность / Competency (Russia). – 2020. – № 7.
3. Шитова, Д.С. Взаимное признание результатов измерений на международном уровне / Д.С. Шитова, Т.В. Шушкевич // Международный научный журнал «Инновационная наука». – 2016. – № 6. – С. 174–175.
4. Травма. В 3-х т. Т 1. / Дэвид В. [и др.] / пер. с англ.; под ред. Л.А. Якимова, Н.Л. Матвеева – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – С. 520.
5. Holbourn. A. Mechanics of head injuries / A. Holbourn. // Lancet. – 1943. – Vol. 242, № 6267. – P. 438–441.
6. Zhang, L. A proposed injury threshold for mild traumatic brain injury / L. Zhang, K.H. Yang, A.I. King // J. Biomech. Eng. – 2004. – Vol. 126. – P. 226–236.
7. Беляева, Н.Н. Морфологические критерии риска вредного воздействия факторов окружающей среды на организм / Н.Н. Беляева // Гигиена и санитария. – 2002. – № 6. – С. 75–76.

УДК 539.3

ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ ДВУХОПОРНОЙ СОСТАВНОЙ БАЛКИ

Дудяк А.И., Хвасько В.М.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассматривается поперечный изгиб двухопорной балки, составленной из двух стержней, выполненных из одного материала. Приводятся два случая закрепления торцов стержней балки: 1) составные стержни не связаны между собой; 2) торцы составных стержней жестко соединены друг с другом сваркой или склеиванием. Были получены формулы для определения углов поворота торцов стержней и прогиба балки посередине пролета. Предложенная методика основана на методе начальных параметров, однако при этом учитывается влияние закрепления торцов стержней в составной балке.

Ключевые слова: изгибающий момент, угол поворота, прогиб, составная балка.

DEFORMATIONS DURING TRANSVERSE BENDING OF A TWO-SUPPORTED COMPOSITE BEAM

Dudjak A.I., Khvasko V.M.

Belarussian national technical university
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The transverse bending of a two-supported beam composed of two rods made of the same material is considered. Two cases of fixing the beam rods ends are given: 1) composite rods are not connected to each other; 2) the ends of the composite rods are rigidly connected to each other by welding or gluing. Formulas were obtained to determine the angles of rotation of the rods ends and the beam deflection in the middle of the span. The proposed method is based on the initial parameters method however it takes into account the influence of fixing the rods ends in a composite beam.

Key words: bending moment, angle of rotation, deflection, composite beam.

Адрес для переписки: Дудяк А.И., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: dudjak@mail.ru, smat@bntu.by

В данной работе ставится цель разработать методику расчета деформаций при поперечном изгибе двухопорной балки, составленной из двух стержней, выполненных из одного материала, в зависимости от способов закрепления ее торцов.

В первом случае рассмотрим двухопорную балку, состоящую из двух стержней, не связанных между собой, а свободно лежащих друг на друге. В качестве нагрузки выберем поперечную силу F , приложенную посередине пролета балки

(рисунок 1, а). Примем, что оба стержня выполнены из одного и того же материала и имеют поперечные сечения прямоугольной формы с одинаковой шириной b и высотой h (рисунок 1, б).

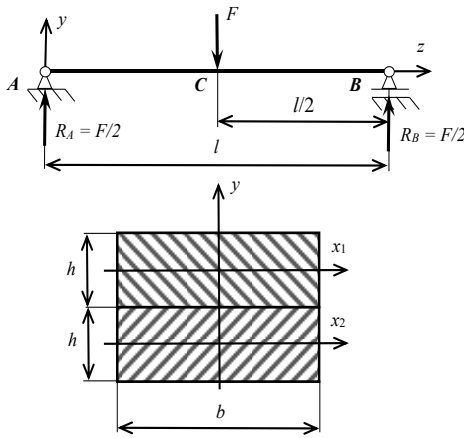


Рисунок 1 – Схема нагружения балки, составленной из стержней, не связанных между собой (а) и поперечное сечение балки (б)

Углы поворота торцов стержней θ можно определить с помощью метода начальных параметров, который можно представить в следующем виде [1]:

$$(EI_x)_c \cdot y_B = (EI_x)_c \cdot y_A + (EI_x)_c \cdot \theta_A l + R_A \frac{l^3}{6} - F \frac{(l/2)^3}{6} = 0, \quad (1)$$

где y_B, y_A – прогибы на опорах B и A соответственно;

Суммарная жесткость сечения балки [2]:

$$(EI_x)_c = E(I_{x1} + I_{x2}) = E \left(\frac{bh^3}{12} + \frac{bh^3}{12} \right) = E \frac{bh^3}{6},$$

где l – длина пролета балки.

С учетом, что на опорах $y_B = y_A = 0$, то окончательно получим:

$$\theta_A = \theta_B = \theta = - \frac{Fl^2}{16(EI_x)_c}. \quad (2)$$

Во втором случае рассмотрим способ соединения составных стержней балки в единое целое торцевой сваркой или склеиванием. Расчетная схема полученной таким способом балки, подвергнутой поперечному изгибу силой F , показана на рисунке 2.

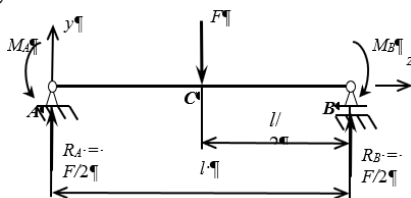


Рисунок 2 – Схема нагружения балки, составленной из жестко связанных между собой стержней

При деформации такой балки составные стержни будут изгибаться независимо друг от друга, при этом торцы стержней повернутся относительно первоначального положения на одинаковые углы $\theta_A = \theta_B = \theta$, что обусловлено симметрией нагружения балки.

В результате такого соединения стержней и одновременном действии поперечного изгиба в окрестности торцов стержней будут возникать одинаковые по величине изгибающие моменты $M_A = M_B = M$ (рисунок 2).

При составлении торцов стержней в одну плоскость для случая их жесткого соединения угол поворота сечения относительно вертикали станет равным $\frac{\theta}{2}$. Используя это условие и формулу (2), запишем выражение для прогиба сечения B балки согласно методу начальных параметров [1]:

$$(EI_x)_c \cdot y_B = (EI_x)_c \cdot y_A + (EI_x)_c \cdot \frac{\theta_A}{2} l - M \frac{l^2}{2} + R_A \frac{l^3}{6} - F \frac{(l/2)^3}{6} = 0. \quad (3)$$

Так как на опорах $y_B = y_A = 0$, то из уравнения (3) можно получить выражение для определения величины торцевого изгибающего момента:

$$M = \frac{Fl}{16}. \quad (4)$$

Следовательно, становится возможным определение прогибов составной балки в любом сечении по длине балки. Наиболее опасным сечением будет окрестность точки C , где согласно методу начальных параметров [1] и формул (2), (4), можно получить следующее соотношение:

$$(EI_x)_c \cdot y_C = (EI_x)_c \cdot \left(- \frac{Fl^2}{32(EI_x)_c} \right) \cdot \frac{l}{2} + \frac{F}{2} \cdot \frac{l^3}{48} - \frac{Fl}{16} \cdot \frac{l^2}{8}, \quad (5)$$

откуда следует, что:

$$y_C = - \frac{5Fl^3}{384(EI_x)_c}, \quad (6)$$

где y_C – прогиб балки посередине пролета.

Таким образом, предложена методика определения деформаций при изгибе составной балки, которая основана на методе начальных параметров, но при этом учитывается влияние закрепления торцов составных стержней.

Литература

1. Подскребко, М.Д. Сопротивление материалов: учебник / М.Д. Подскребко. – Минск : Высш. шк., 2007. – 800 с.
2. Дудяк, А.И. Изгиб составных балок / А.И. Дудяк, В.М. Хвасько // Теоретическая и прикладная механика: международный научно-технический сборник / БНТУ; редкол.: Ю.В. Василевич (пред. редкол., гл. ред.). – Минск : БНТУ, 2022. – Вып. 36. – С. 118–120.

УДК 621.382

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА АЛЮМИНИЙ-ПОЛИКРЕМНИЙ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛИТЕЛЬНОГО И БЫСТРОГО ТЕРМИЧЕСКИХ ОТЖИГОВ МЕТОДОМ ЭНЕРГОДИСПЕРСИОННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО МИКРОАНАЛИЗА

Пилипенко В.А., Ковальчук Н.С., Жигулин Д.В., Шестовский Д.В.

Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Приведены результаты исследования границы раздела алюминий-поликремний после воздействия длительного и быстрого термических отжига методом энергодисперсионного рентгеновского микроанализа. Установлено, что при термическом отжиге (450 °С, 20 мин) поликремний полностью растворяется в алюминии с последующей его сегрегацией в виде отдельных агломератов в пленке алюминия. При быстром термическом отжиге (450 °С, 7 с) такого явления не обнаружено. Таким образом, замена традиционно используемого термического отжига на быстрый термический отжиг наиболее целесообразна, поскольку позволяет существенно уменьшить растворение поликремния в алюминии, и избежать разрушение омических контактов в процессе изготовления интегральных микросхем.

Ключевые слова: омический контакт, граница раздела алюминий-поликремний, быстрая термообработка, интегральная микросхема.

STUDY OF THE ALUMINUM-POLYSILICON INTERFACE AFTER IMPACT OF LONG-TERM AND RAPID THERMAL ANNEALING BY ENERGY DISPERSIVE X-RAY MICROANALYSIS METHOD

Pilipenko V.A., Kovalchuk N.S., Zhyhulin D.V., Shestovski D.V.

Joint Stock Company "INTEGRAL" – "INTEGRAL" Holding Managing Company
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The results of studying the aluminum-polysilicon interface after exposure to long-term and rapid thermal annealing using energy dispersive X-ray microanalysis are presented. It has been established that during thermal annealing (450 °C, 20 min), polysilicon is completely dissolved in aluminum, followed by its segregation in the form of separate agglomerates in aluminum. During rapid thermal annealing (450 °C, 7 s), such a phenomenon was not detected. Thus, replacing thermal annealing with rapid thermal annealing is most appropriate, since it allows reducing the dissolution of polysilicon in aluminum and avoiding the destruction of ohmic contacts during the manufacture of integrated circuits.

Key words: ohmic contact, aluminum-polysilicon interface, rapid thermal, integrated circuit.

Адрес для переписки: Жигулин Д.В., ул. Казинца И.П., 121А, г. Минск, 220108, Республика Беларусь
e-mail: zhygulin@mail.ru

Введение. Термическое воздействие – основная технологическая операция, применяемая в процессе создания интегральных микросхем (ИМС). Каждый топологический слой, при своем создании, имеет свою термическую нагрузку, которая зависит не только от расположения слоев и материалов, используемых при его изготовлении, но и от плотности упаковки топологических элементов. Чем большая плотность упаковки, тем меньше термическую нагрузку должны испытывать полупроводниковые кристаллы при создании ИМС. Такая тенденция при уменьшении проектных норм изготовления микросхем предполагает постепенную замену длительного термического отжига (ДТО) на быстрый термический отжиг (БТО), что непременно скажется на выходных характеристиках интегральных схем, а значит, и на их работоспособность.

В данной работе показано, что происходит с поликремниевым затвором (ПКК) в процессе изготовления омического контакта алюминий-поликремний при использовании стандартного ДТО (450 °С, 20 мин), и его замены на БТО (450 °С, 7 с).

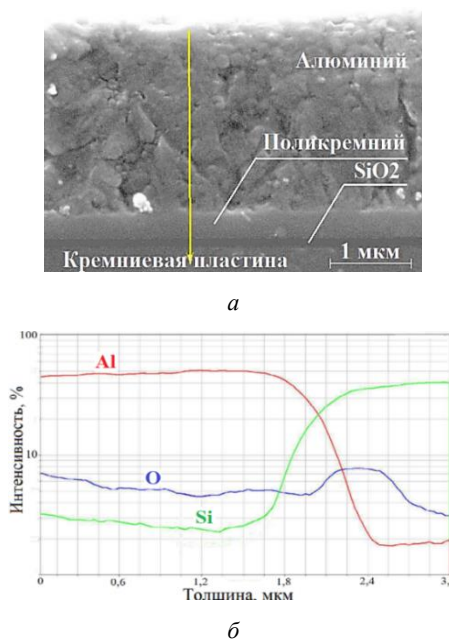


Рисунок 1 – Скол структуры Al-ПКК-SiO₂ без термической обработки (а) и распределение элементов вдоль линии сканирования (б)

Экспериментальные результаты. На кремниевых пластинах КДБ 10 пирогенным окислением при температуре 850 °С формировался окисел кремния. Затем на окиселе кремния методом газофазного осаждения формировался ПКК толщиной 0,25 мкм на поверхность которого магнетронным распылением напылялась пленка алюминия (с 1 % примеси Si), толщиной 1,5 мкм. Полученные структуры Al-ПКК-SiO₂ были подвергнуты различным термообработкам: длительной термической обработке (ДТО) (450 °С, 20 мин, N₂) и быстрой термической обработке (БТО) (450 °С, 7 с, Ar).

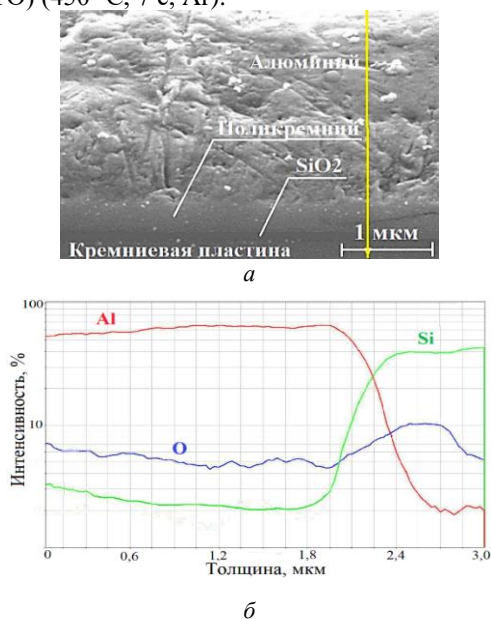


Рисунок 2 – Скол структуры Al-ПКК-SiO₂ после БТО (а) и распределение элементов вдоль линии сканирования (б)

Исследование границы раздела Al-ПКК осуществлялась на сколе пластины с помощью расторового электронного микроскопа (РЭМ) S-4800 (Hitachi, Япония) и энергодисперсионного спектрометра Quantax 200 (Bruker, Германия).

На рисунке 2 приведена структура Al-ПКК-SiO₂ с использованием БТО (450 °С, 7 с).

Из графиков видно, что после БТО точка пересечения линий алюминия и кремния сдвинута правее относительно линии кислорода (SiO₂). Это указывает на то, что верхняя граница поликремния начала растворяться в алюминии, формируя омический контакт. На рисунке 3 приведен скол

структуры Al-ПКК-SiO₂ полученной с применением ДТО (450 °С, 20 мин).

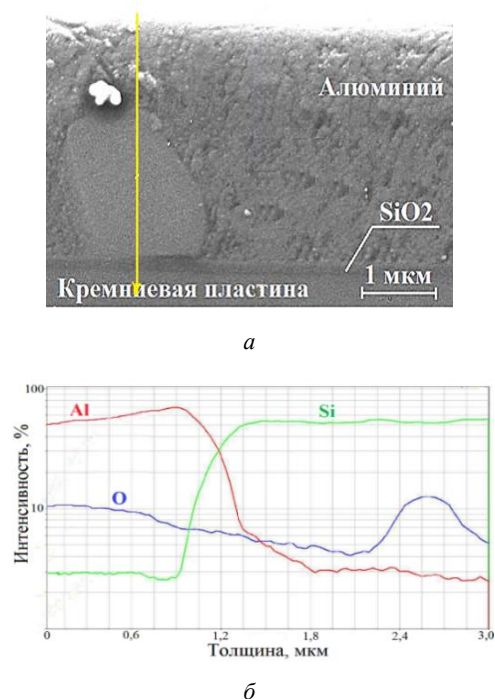


Рисунок 3 – Скол структуры Al-ПКК-SiO₂ после ДТО (а) и распределение элементов вдоль линии сканирования (б)

Из рисунке 3 видно, что при ДТО поликремний полностью растворяется в алюминии с образованием конгломератов кремния.

Заключение. Таким образом, использование ДТО на стадии формирования омических контактов Al-ПКК нецелесообразно, поскольку может привести к их разрушению и полному отказу ИМС.

Литература

1. Пилипенко, В.А. Быстрые обработки в технологии СБИС / В.А. Пилипенко. – Минск : Издательский центр БГУ, – 2004.
2. Фазы внедрения в технологии полупроводниковых приборов и СБИС / О.А. Агеев [и др.] / Харьков : НТК Институт монокристаллов, – 2008.
3. Пилипенко, В.А. Модель взаимодействия кремния с алюминием при фотонной обработке / В.А. Пилипенко, В.В. Рожков, В.А. Горущко // Электронная техника. – 1990. – Сер. 2, вып. 3. – С. 24–28.

УДК 620.19

ОЦЕНКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Крень А.П.^{1,3}, Ланцман Г.А.¹, Мацулевич О.В.¹, Протасеня Т.А.¹, Никифоров А.В.¹, Делендик М.Н.²,
Пантелеев К.В.³

¹ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

²МИПК и ПК БНТУ

³Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Установлен характер изменения статической твердости при повышенных температурах для различных металлов. Показано, что для армко-железа наблюдается практически постоянное значение твердости до температуры 300 °С, далее ее снижение с резким повышением при повышении температуры выше линии A_3 на диаграмме железо-углерод. Получены зависимости изменения модуля упругости и динамической твердости. Показано, что изменение модуля упругости менее значительно, чем изменение твердости при повышении температуры.

Ключевые слова: твердость, модуль упругости, температура, металл, микроударное индентирование.

EVALUATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF METALS AT HIGH TEMPERATURES

Kren A.P.^{1,3}, Lantsman G.A.¹, Matsulevich O.V.¹, Pratasenia T.A.¹, Delendik M.N.², Pantišaleyeu K.U.³

¹Institute of applied physics of the NAS of Belarus

²Branch of the Belarusian National Technical University "Intersectoral Institute for Staff Training and Retraining on Management and Personnel Development"

³Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The nature of the change in static hardness at elevated temperatures for various metals has been established. It is shown that for armco-iron there is an almost constant hardness value up to a temperature of 300 °C, then it decreases with a sharp increase as the temperature rises above line A_3 on the iron-carbon diagram. The dependences of the change in elastic modulus and dynamic hardness were obtained. It has been shown that the change in elastic modulus is less significant than the change in hardness with increasing temperature.

Key words: 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

Испытание материалов индентированием в настоящее время является одним из наиболее востребованных методов определения механических характеристик. Его большое распространение отчасти обусловлено простотой требований к образцу: чистая и ровная поверхность. Эта простая геометрия обеспечивает значительные преимущества по сравнению с традиционными испытаниями на растяжение или сжатие, которые требуют вырезки материала из изделия и тщательной обработки образцов. Еще большей популярности метода способствовала автоматизация процессов измерений, возможность проведения испытаний в нескольких точках, работа в различных режимах нагружения (циклическом, однократном и др.). В последнее время намечается тенденция к изучению высокотемпературных свойств металлов и сплавов данным методом. Однако статическое индентирование занимает относительно большое время для проведения измерения, за которое образец успеет потерять часть тепла (от укладки на столик до получения результата может пройти несколько минут). При этом установки, которые

имеют термокамеры и позволяют провести локальный нагрев с помощью токов высокой частоты, являются громоздкими и дорогостоящими. В этой связи нами была изучена возможность определения высокотемпературных характеристик металлов с помощью динамического микроударного индентирования, которое позволяет провести измерения безобразцовым методом.

Основным оборудованием при испытаниях являлся прибор типа ТПЦ-7DL с удлиненной насадкой, позволяющей проводить измерения для нагретых до высоких температур металлов. Прибор работает совместно с электронным блоком, обеспечивающим оцифровку исходного сигнала, получение диаграммы вдавливания и расчет таких характеристик как твердость и модуль упругости [1; 2]. В качестве образцов для испытаний были взяты образцы из армко-железа, стали 09X18H10T и алюминиевого сплава Д16 с различной исходной статической твердостью H_c (таблица 1). Для измерения температуры использовался тепловизор FLIR, откалиброванный по специальной методике на этих же образцах (рисунок 1).

Таблица 1 – Исходные характеристики образцов

Образец	Твердость НВ, ед
Армко-железо (ТЧЖ)	85
09Х18Н10Т	161
Алюминий	94

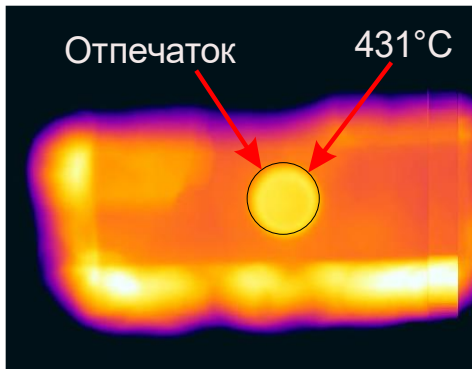


Рисунок 1 – Измерение температуры в отпечатке

На рисунке 2 показано изменение статической H_c и динамической твердости H_d для армко-железа в диапазоне температур от 20 до 1100 °С. Как видно из графика, характер их изменения в обоих случаях подобен, однако динамическая твердость имеет большую чувствительность к температуре.

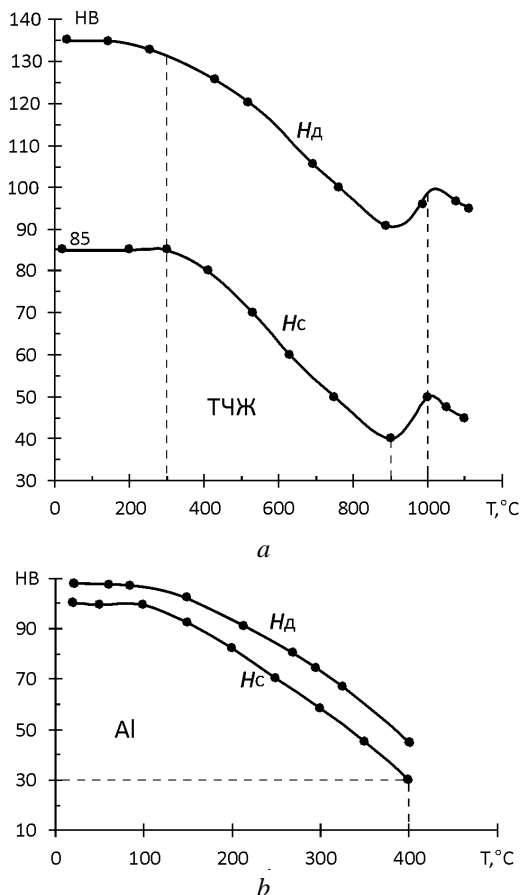


Рисунок 2 – Результаты измерения твердости при повышенной температуре: а – армко-железо, б – Д16

Для ТЧЖ снижение твердости происходит уже при 200 °С, в то время как H_c начинает уменьшаться только при 300 °С. При этом в обоих случаях наблюдается повышение твердости при $T > 900$ °С, что может свидетельствовать о полиморфных превращениях в металле. Также можно отметить, что коэффициент динамичности H_d/H_c тем больше, чем меньше твердость, что полностью соответствует существующим данным. Для алюминия разница между твердостями также имеется, однако она не так значительна.

Изменение модуля упругости показано на рисунке 3. Здесь можно отметить, что модуль упругости E , измеренный динамическим индентированием, менее чувствителен к температуре. Наименьшее изменение можно отметить для нержавеющей стали. Этот факт также указывает на то, что измерение статической твердости по коэффициенту восстановления скорости становится невозможным, поскольку динамическая твердость является функцией как пластических, так и упругих свойств. И в случае непропорционального снижения модуля упругости пересчетные коэффициенты будут изменяться и являться функцией температуры.

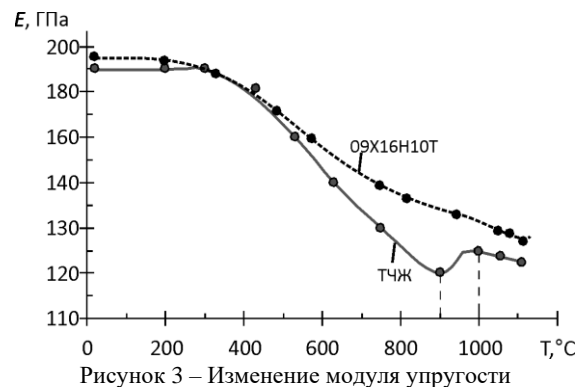


Рисунок 3 – Изменение модуля упругости

Полученные результаты – определение величины «горячей твердости» и модуля упругости – могут использоваться при разработке режимов пластической деформации металлов (прокатке, штамповке, вытяжке и др.), для подбора оптимальных температур технологических процессов на прокатных станах с целью снижения энергетических затрат и износа оборудования.

Литература

1. Influence of the dynamic indentation parameters on the behavior of metals during the penetration of an indenter with a spherical tip / A.P. Kren [et al.] // Russian Metallurgy (Metally). – 2021. – № 4. – P. 563–569.
2. Kren, A.P. Non-destructive evaluation of metal plasticity using a single impact microindentation / A.P. Kren, M. Delendik, A. Machikhin // International Journal of Impact Engineering. – 2022. – V. 162. – P. 104141.

УДК 620.19

ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ИНДЕНТИРОВАНИЯ К ИЗМЕНЕНИЮ СОСТОЯНИЯ БИТУМА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ СТАРЕНИИ

Крень А.П.¹, Мацулевич О.В.¹, Делендик М.Н.², Гориченко С.Ф.³

¹ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

²МИПК и ПК БНТУ

³УП «Мингаз»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Выполнен анализ влияния повышенной температуры на изменение механических характеристик битумно-мастичной изоляции газопроводов. Установлено, что коэффициент жесткости, определяемый при индентировании, обладает достаточной чувствительностью по отношению к другим показателям – индексу пенетрации и переходному электросопротивлению и может использоваться в качестве диагностического параметра.

Ключевые слова: битумная изоляция, старение, газопровод, микроударное индентирование.

ASSESSMENT OF THE SENSITIVITY OF INDENTATION PARAMETERS TO CHANGES IN THE STATE OF BITUMEN AT THE AGING

Kren A.P.¹, Matsulevich O.V.¹, Delendik M.N.², Gorichenko S.F.³

¹Institute of applied physics of the NAS of Belarus

²Branch of the Belarusian National Technical University "Intersectoral Institute for Staff Training and Retraining on Management and Personnel Development"

³UI "Mingas"

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. An analysis of the effect of elevated temperature on the changes of the mechanical characteristics of bitumen-mastic insulation of gas pipelines was carried out. It has been established that the coefficient of stiffness determined during indentation is sufficiently sensitive in relation to the other indicators – the penetration index and transient electrical resistance and can be used as a diagnostic parameter.

Key words: bitumen insulation, aging, gas pipeline, micro-impact indentation.

Адрес для переписки: Крень А.П., ул. Академическая, 16, г. Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: alekspk@iaph.bas-net.by

Индентирование широко применяется для измерения механических характеристик различных материалов: модуля упругости, прочности, твердости и др. При этом многими авторами показано, что вязкоупругий отклик материала на приложенное воздействие существенно меняется после его термического старения. Этот факт делает перспективным применение метода для оценки состояния битумно-мастичной изоляции, использующейся для защиты газопроводов от коррозионного воздействия окружающей среды.

В настоящее время основным параметром, по которому принято судить о защитных функциях покрытия и степени его старения является величина переходного электрического сопротивления R [1]. Однако на эту величину значительное воздействие оказывает влажность грунта и самого покрытия. При изменениях влажности грунта, вызванных мероприятиями по водоотведению, величина электросопротивления резко возрастает. Однако, в случае, когда произошло существенное старение непосредственно материала покрытия, падение защитных свойств будет более значительным.

В настоящей работе был изучен ряд вариантов воспроизведения эффекта старения для прогнозирования в дальнейшем поведения битума в процессе службы.

Для оценки исходного состояния изоляции измерялись переходное электросопротивление R , коэффициент жесткости C_m и индекс пенетрации PI . Общая схема проведения эксперимента показана на рисунке 1. Коэффициент C_m измерялся методом динамического индентирования. Экспериментальные исследования проводились с использованием для старения термошкафа СНОЛ и установки ИПМ, разработанной в ИПФ НАН Беларуси [2].



Рисунок 1 – Схема проведения эксперимента

Исходные свойства образцов битумно-мастичной изоляции марки БНИ-IV-3, которые были отобраны при ремонте газопроводов на различных улицах г. Минска, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Исходные характеристики изоляции

№	R , Ом·м	C_M , кН/м	PI
1	$3,68 \cdot 10^4$	1,21	68
2	$1,06 \cdot 10^5$	1,13	59
3	8,49	0,72	44

Как показали предыдущие исследования [3], оптимальной моделью для описания вязкоупругого отклика битумно-мастичной изоляции является модель Максвелла, состоящая из последовательно соединенных пружины и демпфера, которые характеризуют упругие и вязкие свойства материала и которые определяются соответственно коэффициентом жесткости C_M и коэффициентом вязкости η_M .

Исходное R защитного покрытия определяли по схеме изложенной в ГОСТ 9.602-2016 после 12 суток выдержки образцов в растворе хлорида натрия при температуре 20 °С. Измерение PI (таблица 1) проводили на пенетрометре по ГОСТ 9.602-2016 с оценкой глубины погружения иглы в испытуемый образец битума при температуре 25 °С, нагрузке 100 г и продолжительности приложения нагрузки 5 секунд. Для проведения экспериментов по термическому старению изоляция снималась с труб, измельчалась и засыпалась в специально изготовленные ячейки. Далее происходил ее нагрев при температуре 100 °С в течение 60 минут в результате чего она размягчалась и растекалась ровным слоем в ячейке.

На рисунок 2 показано изменение характеристик от времени старения по режимам, представленным на рисунке 1. Измерения проводились через 1, 2, 4, 6, 8 и 10 часов. После этих периодов времени образцы извлекались из термощафа и охлаждались до 24 ± 1 °С для проведения испытаний. Для независимой оценки изменения свойств после окончания старения было также проведено измерение индекса пенетрации (рисунок 2, *d*). Анализ зависимостей на рисунок 2 показывает, что наибольшее изменение C_M (~ 22 %) при тепловом старении по методу А (163 °С) в течение 10 часов произошло для образца 1. При этом максимальное значение коэффициента жесткости было достигнуто через 4 часа. Для образца 2 C_M приобрел свою максимальную величину уже после 2 часов старения, а отклонение при этом составило 19 %. Наименьшее изменение было характерно для образца 3 – 8,5 %. Однако оно было достигнуто за минимальное для исследуемых образцов время – 2 ч.

Для метода В (150 °С) и С (150/–20 °С) C_M для всех образцов приобретал свое максимальное значение несколько позже. При этом термоциклирование с охлаждением образцов до –20 °С практически не давало вклада в изменение C_M . Старение

при 110 °С (метод D) не привело к значимому увеличению жесткости.

Изменение индекса пенетрации для метода А составило: 14,7 %, 16,9 % и 4,5 % для образцов 1, 2 и 3 соответственно.

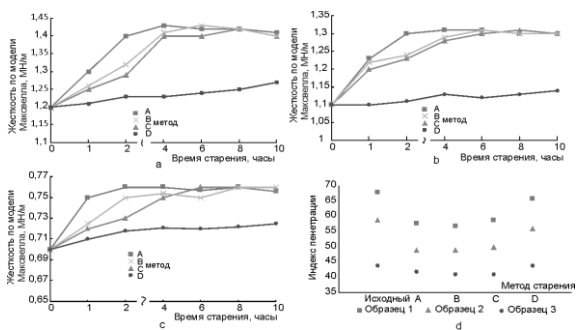


Рисунок 2 – Зависимости изменения характеристик от времени старения для образцов, представленных в таблице 2: *a* – образец № 1; *b* – образец № 2; *c* – образец № 3; *d* – изменение индекса пенетрации

Полученные результаты позволяют утверждать, что оптимальным в дальнейшем является прогнозирование остаточного ресурса изоляции по скорости достижения предельного состояния и процентному изменению значения жесткости материала покрытия. Так, для образца 2, несмотря на то, что значение переходного электросопротивления $R = 1,06 \cdot 10^5$ Ом·м является наибольшим из исследуемых образцов, его выход из строя по данным теплового старения является более вероятным, поскольку предельное состояние достигается за более короткое время. Что касается образца 3, то, по видимому, он уже находится в предельном состоянии и покрытие из этого материала не способно выполнять защитную функцию. Этот материал практически сразу достигает максимального значения жесткости (через 1 час после начала старения). Абсолютное изменение жесткости для него является минимальным, как и значение переходного электросопротивления $R = 8,49$ Ом·м (таблица 1).

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ: грант T22-005 «Изучение процессов деградации изоляционных покрытий газопроводов и разработка методики неразрушающего контроля их свойств и остаточного ресурса».

Литература

1. Методика определения остаточного ресурса изоляционных покрытий подземных трубопроводов: РД 39Р-00147105-025-02. – Минэнерго России, Уфа : Монография, 2002 г.
2. Influence of the dynamic indentation parameters on the behavior of metals during the penetration of an indenter with a spherical tip / A.P. Kren [et al.] // Russian Metallurgy (Metally). – 2021. – № 4. – P. 563–569.
3. Оценка степени старения битумно-мастичной изоляции газопроводов по изменению механических характеристик / А.П. Крень [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2022. – № 12, Т. 25. – С. 32–38.

УДК 658.5.011

МЕХАНИЗМЫ ПОВЫШЕНИЯ ВОВЛЕЧЕННОСТИ ПЕРСОНАЛА В СИСТЕМУ МЕНЕДЖМЕНТА ОРГАНИЗАЦИИ

Ленкевич О.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной работе рассмотрены механизмы повышения вовлеченности персонала в систему менеджмента организации на этапах анализа, планирования, внедрения и оценки, а также достижения необходимого уровня компетентности.

Ключевые слова: ABC-анализ, аттестация персонала, анкетирование, вовлеченность персонала, компетентность, самооценка.

Increasing customer satisfaction Lenkevich O.A.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. This paper examines mechanisms for increasing personnel involvement in the organization is management system at the stages of analysis, planning, implementation and evaluation, as well as achieving the required level of competence.

Key words: ABC analysis, personnel certification, questionnaires, personnel involvement, competence, self-esteem.

Адрес для переписки: Ленкевич О.А., ул. Сурганова 40, кв. 85, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
e-mail: Lenolga@tut.by

Современная организация представляет собой динамично развивающую структуру. Требования потребителей и заинтересованных сторон постоянно изменяются, поэтому руководству организации необходимо создавать условия, позволяющие вовлекать сотрудников в достижение поставленных целей. Организации следует рассматривать своих сотрудников как самую большую ценность, а их знания и опыт как один из аспектов своей конкурентоспособности. Деятельность по обеспечению вовлеченности персонала в систему менеджмента организации является непрерывным процессом. Процессный подход основывается на внедрении управленческого цикла *P-D-S-A*. Для реализации такого подхода необходимо при разработке соответствующей документированной процедуры учитывать следующие этапы вовлеченности персонала:

- 1) анализ данных, связанных со стратегическим и оперативным планированием организации в части вовлеченности сотрудников и их уровня компетентности;
- 2) планирование процесса вовлеченности персонала и приобретение ими необходимой компетентности;
- 3) внедрение планов и разработанных мероприятий для вовлеченности персонала и достижения требуемого уровня компетентности;
- 4) оценка реализации поставленных задач по вовлеченности персонала и достижения необходимого уровня компетентности.

Необходимо учитывать, что на каждом из этапов могут возникать соответствующие риски не достижения поставленных задач [1].

Основная группа рисков – это риски ошибочного выбора направлений кадрового менеджмента, который должен, безусловно, опираться на требования системы менеджмента организации. Одна из причин такого положения – необоснованное определение приоритетов стратегии в управлении персоналом, вовлеченности в систему менеджмента и их необходимой компетентности для достижения целей организации.

Вторая группа рисков – эти риски, связанные с низким уровнем кадрового обеспечения. Конкурентоспособность организации зависит в том числе, насколько персонал осознает свою ответственность и заинтересованность в результатах своего труда.

Риски, связанные с неэффективной системой мотивации и стимулирования персонала, – третья группа рисков. Система мотивации должна включать материальное и нематериальное стимулирование, например, одобрение, проявление интереса к сотруднику и т. д.

Четвертая группа рисков – это риски, связанные с информационной безопасностью в процессе работы, при увольнении сотрудника. Простым и доступным инструментом не только контроля сотрудников, но и защиты информации является разграничение доступа к данным, даже если они не являются конфиденциальными.

При разработке соответствующей документированной процедуры по обеспечению требуемого уровня компетентности и вовлеченности персонала организация должна учитывать эти и другие виды рисков.

Этап анализа должен начинаться с идентификации потребностей, связанных с вовлеченностью

и компетентностью персонала. Для выявления необходимых потребностей можно, например, использовать причинно-следственную диаграмму либо диаграмму 5М. К факторам, влияющим на вовлеченность и компетентность можно отнести:

- профессиональный подбор персонала при приеме на работу;
- мотивация деятельности;
- обеспечение необходимой окружающей средой;
- лидерство;
- ответственность и полномочия;
- способность работы в команде.

Для сокращения количества выделенных факторов и определения действительно наиболее значимых можно, например, построить диаграмму Парето и провести ABC-анализ.

После завершения этапа анализа разрабатываются мероприятия по планированию вовлеченности персонала в систему менеджмента организации и приобретения ими необходимой компетентности. Сотрудники должны понимать свою роль в достижении поставленных целей. Все выявленные на предыдущем этапе факторы, должны быть отражены в соответствующих анкетах, заполняемых кандидатами при приеме на работу и последующей их аттестации. Для установления лидерских качеств соискателей можно использовать тест по И. Адезису, в соответствии с которым выделяют четыре управленческие роли:

- реализатор;
- администратор;
- предприниматель;
- интегратор [2].

Варианты ответов соискателя ранжируются от 1 (наиболее соответствующее стилю управления) до 4 (наименее соответствует стилю управления). Наименьшее полученное значение в большей степени характеризует лидерские качества соискателя.

Этап планирования вовлеченности и достижения требуемой компетентности заканчивается разработкой индивидуального плана по повышению квалификации сотрудника.

Реализация планов и разработанных мероприятий требует обеспечение условий для их выполнения. Например, можно создавать рабочие группы, куда необходимо включить наиболее опытных и авторитетных сотрудников из разных подразделений. Они на деле показывают свою приверженность требованиям системы менеджмента организации и будут являться примером для подражания других сотрудников.

Регулярное обучение и образование также являются неотъемлемыми факторами для повышения вовлеченности и компетентности персонала.

Для оценки результативности обучения можно предложить следующие критерии:

- оценка степени удовлетворенности сотрудника, прошедшего обучение в приобретении необходимых знаний, навыков и качеств;
- оценка степени удовлетворенности руководства сотрудником, прошедшим обучение.

Для оценки по первому критерию используется анкетирование с квалитметрическими балльными оценками, представляемыми заполняемым. Анкеты для оценивания обучения заполняются сотрудниками сразу после курсов. Служба качества организации проводит анализ и расчет результативности обучения по первому критерию, выявляются причины неудовлетворенности (если таковы имеются) и делаются выводы.

Для оценки по второму критерию, непосредственный руководитель обучаемого, например, через месяц после курсов оценивает результативность обучения сотрудника в баллах в соответствии с анкетой. Оценивание проводится по 10-балльной шкале, где 1 – неудовлетворительная оценка, а 10 – отличная оценка. Затем служба качества сравнивает результаты, полученные при оценке по первому критерию – удовлетворенность обучившегося и удовлетворенность руководства. При рассогласовании полученных результатов, выявляются причины такой ситуации и проводятся корректирующие действия, устраняющие данные несоответствия по обучению. Для более объективного оценивания сложившейся ситуации можно построить на данном этапе диаграмму Тито Конти.

На этапе оценки реализации поставленных задач можно использовать, например, самооценку персонала, используя методику, основанную на уровнях зрелости. Вопросы предварительно разрабатываются службой качества организации совместно с заинтересованными подразделениями. Оценка согласовывается с мероприятиями по развитию организации и требованиями потребителей и заинтересованных сторон. Результаты оценки должны определять разницу между предыдущим и текущим состоянием вовлеченности сотрудников.

Признаками активной вовлеченности сотрудников могут быть следующие:

- они активно вносят новые идеи для достижения поставленных целей и задач;
- принимают новшества с энтузиазмом;
- конструктивно общаются с коллегами и руководством и т. п.

Литература

1. Риски в системе управления персоналом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://studme.org/1265042826181/menedzhment/riski_sisteme_upravleniya_personalom.

2. Adizes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://adizes.me/paei_test.

УДК 621.3.049.77:621.373.826

**МОДЕЛЬ ТВЕРДОФАЗНОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕХАНИЧЕСКИ
НАРУШЕННОГО СЛОЯ КРЕМНИЯ ПРИ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ**

Пилипенко В.А., Омельченко А.А.

*ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Целью работы являлись разработка модели твердофазной рекристаллизации нарушенного слоя на поверхности кремниевых пластин после химико-механической полировки с применением импульсной фотонной обработки и ее математическое описание. Показано, что за счет снижения энергии активации скорости рекристаллизации нарушенного слоя кремния при его нагреве световыми импульсами до температуры ≥ 950 °C происходит полная его рекристаллизация. Описан процесс рекристаллизации с применением БТО, и определены параметры светового импульса, минимизирующие температурную нагрузку на кремниевую пластину.

Ключевые слова: быстрая термическая обработка, нарушенный слой, кремниевая пластина, твердофазная рекристаллизация, деформационный потенциал.

**MODEL SOLID PHASE RECRYSTALLIZATION OF THE MECHANICALLY
DISRUPTED SILICON LAYER DURING THE RAPID THERMAL TREATMENT**

Pilipenko V.A., Omelchenko A.A.

*OJSC "INTEGRAL" – "INTEGRAL" Holding Managing Company
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The objective of the work was development of the model of solid-phase re-crystallization of the damaged layer on the surface of silicon wafers after chemical and mechanical polishing with application of pulse-photonic processing and its mathematical presentation. It is demonstrated that due to increase of the energy of activating re-crystallization rate of disturbed silicon layer at its being heated by light pulses up to ≥ 950 °C there occurs its full re-crystallization. The process of recrystallization using Rapid Thermal Treatment is described and there are defined the parameters of light pulse, that ensure minimizing the temperature impact on a silicon wafer.

Key words: rapid thermal treatment, disrupted layer, silicon wafer, solid phase re-crystallization, deformation potential.

*Адрес для переписки: Омельченко А.А., ул. Казинца И.П., 121 А, г. Минск, 220108, Республика Беларусь
e-mail: AOmelchenko@integral.by*

Введение. На сегодняшний день важной задачей при создании современных изделий микроэлектроники является устранение на поверхности пластин механически нарушенного слоя. В настоящее время известно два наиболее приемлемых метода устранения механически нарушенного слоя на рабочей поверхности кремниевых пластин. Первый метод предполагает проведение рекристаллизации нарушенного слоя с применением импульсного фотонного излучения наносекундной длительности [1], а второй метод – импульсного излучения галогенных ламп секундной длительности [2]. В первом случае имеет место жидкофазная рекристаллизация механически нарушенного слоя кремния, а во втором – твердофазная. При этом, если модель жидкофазной рекристаллизации хорошо описана в [3], то о модели твердофазной рекристаллизации и ее аналитическом описании данные в литературе практически отсутствуют.

Материалы и методы исследования. Для описания предполагаемой модели рекристаллизации механически нарушенного слоя на рабочей поверхности кремниевых пластин путем ее быстрой термической обработки (БТО) с применением

импульсных фотонных потоков длительностью ~7 секунд, обеспечивающим нагрев пластины до 1100 °C, использовались экспериментальные результаты, изложенные в работах [2].

Результаты и их обсуждение Полученные ранее результаты позволяют предложить следующую модель рекристаллизации механически нарушенного слоя при быстрой термической обработке. Поскольку нарушенный слой представляет собой механически деформированную кристаллическую решетку на поверхности кремния с измененным электрическим полем, то ее поверхностная энергия будет значительно выше, чем свободная энергия недеформированной кристаллической решетки. Образование такого электрического поля, называемого деформационным потенциалом, приводит к возникновению электронного взаимодействия, которое повышает свободную энергию поверхностного слоя. Любая термическая обработка приводит к уменьшению свободной энергии в поверхностном слое кремниевой пластины [4]. Поскольку она во многом связана с деформацией кристаллической решетки, то термическая обработка будет приводить к ее уменьшению за счет снижения механических

напряжений под воздействием температуры. При этом, чем выше температура обработки, тем быстрее и в большей степени происходит уменьшение данной энергии, а, следовательно, и деформации поверхностного слоя. Это в свою очередь приводит к уменьшению искажения кристаллической решетки за счет уменьшения ее деформации в нарушенном слое.

Поскольку процесс рекристаллизации нарушенного слоя идет от слоев кремния с неискаженной кристаллической решеткой, то скорость его протекания будет определяться величиной внешней энергии, подводимой к такой структуре, а также энергией связи Si-Si. В случае быстрой термообработки нагрев происходит за счет поглощения фотонного потока при фотон-электронном взаимодействии, который путем *последовательного электрон-электронного, электрон-фононного и фонон-фононного взаимодействий передает энергию решетке, тем самым повышая ее температуру и приводя к более быстрому подводу энергии к нарушенному слою по сравнению с длительной термообработкой*. Данные механизмы вызывают уменьшение энергии связи Si-Si, в большей степени, чем при длительной термообработке, тем самым имеет место более значительное уменьшение энергии активации скорости рекристаллизации.

Для нахождения толщины рекристаллизованного слоя кремния необходимо знание времени его термообработки, а поскольку при БТО нагрев кремниевой пластины осуществляется секундными длительностями светового потока с последующей стадией остывания, то для характеристики длительности данного процесса введем понятие эффективного времени нагрева ($\tau_{эф}$). Под $\tau_{эф}$ будем понимать время, в течение которого скорость рекристаллизации падает в e раз по отношению к ее максимальному значению. На основании расчета динамики нагрева пластины в процессе было определено $\tau_{эф}$ и установлена зависимость толщины рекристаллизованного механически нарушенного слоя от температуры быстрой термообработки для различных плотностей мощности светового потока при длительности импульса 8 секунд (рисунок 1).

Из рисунка 2 видно, что минимальная температура, обеспечивающая скорости процесса, необходимые для рекристаллизации нарушенного слоя кремния толщиной 0,1 мкм, составляет 950 °С при плотности мощности излучения 40 Вт/см² (рисунок 1). При этом с увеличением плотности мощности излучения до 50 Вт/см², что соответствует росту скорости нагрева пластины, необходимая температура для рекристаллизации слоя толщиной 0,1 мкм возрастает до 987 °С. Это означает, что для минимизации температурного воздействия при

выборе режима БТО требуется учитывать не только температуру процесса, но и скорость ее набора.

На основании полученных результатов (рисунок 1) видно, что наиболее приемлемым режимом БТО, обеспечивающим минимальное время воздействия температуры на кремниевую пластину для проведения твердофазной рекристаллизации нарушенного слоя толщиной 0,1 мкм при температуре 950 °С является плотность мощности светового потока 40 Вт/см² при $t = 3,7$ секунды.

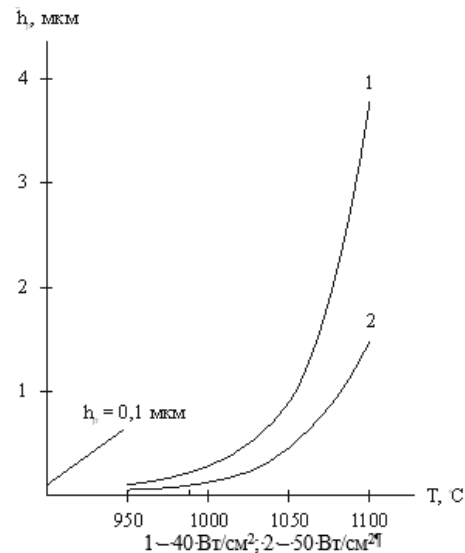


Рисунок 1 – Зависимость толщины рекристаллизованного нарушенного слоя кремния от температуры быстрой термообработки для различных плотностей мощности светового потока при длительности импульса 8 секунд

Заключение. Дано описание процесса рекристаллизации данного слоя, показана закономерность изменения его толщины от режимов такого нагрева. Определены параметры быстрой термической обработки, обеспечивающие минимизацию воздействия температуры на кремниевую пластину для полной рекристаллизации механически нарушенного слоя на ее рабочей поверхности.

Литература

1. Лазерная обработка поверхности кремниевых пластин / В.А. Пилипенко [и др.] // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1984. – Т. 7. – С. 113–118.
2. Re-crystallization of Silicon during Rapid Thermal Treatment / V. Gorushko [et al.] // Przegląd Electrotechniczny. – 2018. – V. 94, № 5. – P. 196–198.
3. Пилипенко, В.А. Быстрые термообработки в технологии СБИС / В.А. Пилипенко. – Минск : Издательский центр БГУ, 2004. – 531 с.
4. Концевой, Ю.А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур / Ю.А. Концевой, Ю.М. Литвинов, Э.А. Фаттахов. – М. : Радио и связь, 1982. – 240 с.

УДК 620.179.18

**ВЛИЯНИЯ ВИДОВ И РЕЖИМОВ ПОСТОБРАБОТКИ ОТВЕРЖДЕННЫХ
ФОТОПОЛИМЕРНЫХ СМОЛ НА УПРУГИЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ СТЕРЕОЛИТОГРАФИИ**

Протасеня Т.А., Ланцман Г.А., Кутепов А.Ю.

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

Аннотация. По результатам исследований установлено, что доотверждение полимерных изделий при высоких температурах (вплоть до 160 °С) и УФ-излучении мощностью 39 Вт позволяет повысить их прочность и модуль упругости на 170 % и 85 % соответственно по сравнению с состоянием до обработки. Данный режим доотверждения является оптимальным в отношении исследуемой высокотемпературной смолы *High Temp RS-F2-HTAM-01*. Для оперативного контроля свойств полимерных материалов, а также объективной оценки эффективности режимов их завершающей полимеризации предложено использовать метод динамического индентирования. Доказано, что чувствительность метода к изменению физико-механических характеристик изделий, полученных по *SLA*-технологии, при различных видах и режимах их постобработки сопоставима с чувствительностью стандартных испытаний на растяжение.

Ключевые слова: модуль упругости, предел прочности, твердость, *SLA*-технология, индентирование.

**EFFECTS OF DIFFERENT TYPES AND MODES OF POST-PROCESSING OF HARDENED
PHOTOPOLYMER RESINS ON THE ELASTIC AND STRENGTH PROPERTIES OF PRODUCTS
PRODUCED BY THE METHOD OF LASER STEREOLITHOGRAPHY**

Pratasenia T.A., Lantsman G.A., Kutsepau A.Y.

*The Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. According to the results of the research, it was found that the post-curing of polymer products at high temperatures (up to 160 °C) and UV radiation with a power of 39 W makes it possible to increase their strength and elasticity modulus by 170 % and 85 %, respectively, compared with the state before processing. This post-curing mode is optimal in relation to the investigated high-temperature resin *High Temp RS-F2-HTAM-01*. For the operational control of the properties of polymeric materials, as well as an objective assessment of the effectiveness of the modes of their final polymerization, it is proposed to use the method of dynamic indentation. It has been proven that the sensitivity of the method to changes in the physical and mechanical characteristics of products obtained by *SLA* technology, with various types and modes of their post-processing, is comparable to the sensitivity of standard tensile tests.

Key words: elastic modulus, tensile strength, hardness, *SLA*-technology, indentation.

*Адрес для переписки: Протасеня Т.А., ул. Академическая, 16, г. Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: 5657397@gmail.com*

Лазерная стереолитография (*SLA*-технология) – это процесс аддитивного производства, при котором изделие формируется путем послойного отверждения фотополимерной смолы под действием лазера. Фотополимерные смолы, находясь изначально в жидком состоянии, представляют собой множество несвязанных мономеров, способных под действием лазера образовывать сшитую макромолекулу. Однако по окончании печати остается множество участков с недостаточно прочными связями, что негативно сказывается на физико-механических характеристиках изделий.

Как правило для повышения их упругих и прочностных свойств используется УФ-излучение, под действием которого происходит завершение формирования молекулярных связей. На процесс отверждения влияет не только УФ-излучение, но и температура. Дополнительное тепловое воздействие приводит к увеличению энергии в полимер-

ной сетке и провоцирует ускоренное движение молекул, что значительно облегчает процесс образования межмолекулярных связей. Тем не менее УФ-излучение является неотъемлемой составляющей процесса постобработки, а термическое воздействие является лишь дополнительным фактором, повышающим качество молекулярной сшивки и ускоряющим процесс доотверждения.

Но наряду с положительным действием ультрафиолета и температуры возможен и обратный эффект, связанный с деградацией материала и повышением его хрупкости. Каждый полимер реагирует на постобработку по-разному и требует разного времени и температурных условий для достижения оптимальных свойств. В этой связи целью исследования являлось исследование комплексного влияния УФ-излучения и температуры на формирование физико-механических характеристик изделий, полученных по *SLA*-технологии,

а также оценка возможности применения в качестве альтернативы общепринятым разрушающим испытаниям метода динамического индентирования (МДИ) для контроля свойств полимерных изделий и оперативного контроля эффективности режима постобработки.

Экспериментальные образцы для проведения исследований изготавливались из инженерной высокотемпературной смолы *High Temp RS-F2-HTAM-01*. Толщина элементарного слоя составляла 100 мкм. Доотверждение материала проводилось под действием УФ-излучения мощностью 36–39 Вт и температуры 60 °С на протяжении 30–80 мин. Для оценки влияния термообработки на физико-механические характеристики изделий завершающим этапом их доотверждения являлся нагрев до температуры 160 °С и выдержка на протяжении 30, 60 и 90 мин.

Результаты испытаний на растяжение таких образцов (предел прочности σ_m и модуль упругости E_S), а также данные, полученные МДИ при нагружении сферическим индентором диаметром 2,3 мм, массой 4,3 г с предупредительной скоростью 0,88 м/с (динамическая твердость H_{IT} и модуль упругости E_{IT}) приведены на рисунке 1.

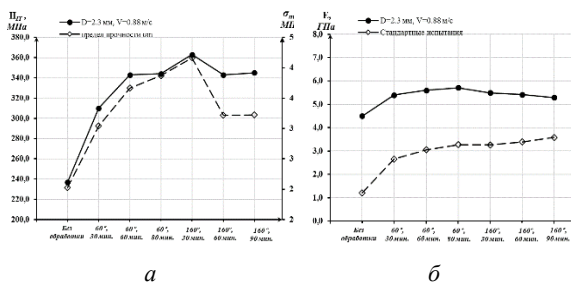


Рисунок 1 – Зависимости изменения H_{IT} и σ_m (а) и E_{IT} и E_S (б) полимера от режимов доотверждения

Как видно из рисунка 1 данные динамического индентирования качественно соответствуют результатам стандартных испытаний. Установлено, что максимальными значениями H_{IT} (363 МПа) обладают образцы, подвергшиеся дополнительному температурному воздействию (160 °С) на протяжении 30 мин. Увеличение времени выдержки до 60 мин. привело к снижению σ_m и H_{IT} на 20 % и 6 % соответственно при незначительной вариации модуля упругости. Выдержка образцов при температуре 160 °С на протяжении 90 мин не привела к существенным изменениям прочностных и упругих свойств как по данным стандартных испытаний, так и по результатам динамического индентирования.

На рисунке 2 полученные результаты дополнены данными о свойствах исследуемого материала, подвергнутого только воздействию УФ-излучения мощностью 36–48 Вт, и представлены в виде зависимости процентного увеличения предела прочности σ_m и модуля упругости E_S при растяжении (рисунок 2).

Как видно из представленных графиков, воздействие на исследуемый материал УФ-излучения (36–48 Вт) вызывает достаточно равномерное увеличение предела прочности и модуля упругости, которое продолжается на протяжении рассматриваемых 60 мин.

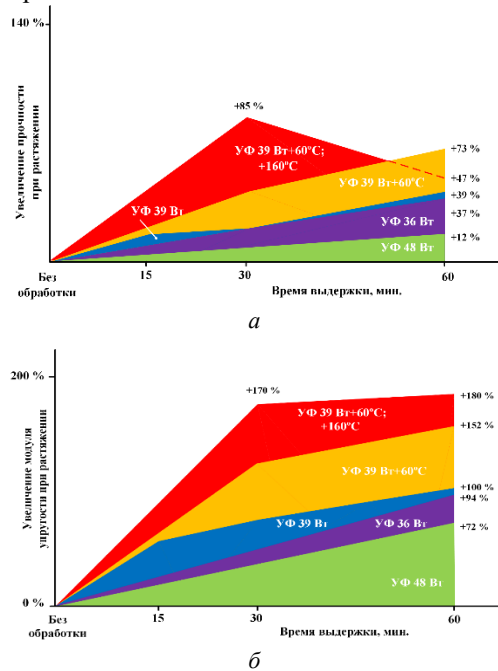


Рисунок 2 – Зависимости увеличения σ_m (а) и E_S (б) от времени выдержки полимера при различных видах постобработки

Однако повышение мощности излучения до 48 Вт вызывает деградацию полимера, что выражается в наименьшем процентном приращении σ_m и E_S . Для исследуемой смолы *High Temp RS-F2-HTAM-01* оптимальным оказалось доотверждение при УФ-излучении мощностью 39 Вт. Дополнительное воздействие температуры (режим 39 Вт + 60 °С) оказывает наибольшее влияние на модуль упругости исследуемого полимера. В первые 60 минут финальной полимеризации установлено максимальное увеличение E_S на 152 %, а σ_m – на 73 %. Улучшить результат удалось при последующей термообработке изделий при 160 °С. В течение первых 30 минут выдержки σ_m и E_S резко повышаются и достигают максимального увеличения на 85 % и 170 %, соответственно. Однако если в течение следующих 30 минут модуль упругости постепенно нарастает (до 180 %), то предел прочности резко падает до 47 %, что может быть следствием повышения хрупкости материала.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований: проект № T22M-004 «Развитие метода локального контактного деформирования для неразрушающего контроля полимерных изделий, полученных путем аддитивного синтеза».

УДК 658.562

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ МЕТОДОВ КАЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА СВОЙСТВ ПРОДУКЦИИ

Рудагин Д.С., Серенков П.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрены перспективы применения экспертных оценок в промышленности на современном этапе развития. Рассмотрена проблема достоверности качественных экспертных оценок. Приведены результаты анализа основных этапов и методов, которые используются при оценивании свойств объекта. Выдвинута гипотеза о основном источнике потерь достоверности качественного экспертного оценивания и предложена концепция решения проблемы.

Ключевые слова: органолептические измерения, качественные экспертные оценки, достоверность.

VALIDATION OF QUALITATIVE ANALYSIS METHODS FOR PRODUCT PROPERTY ASSESSMENT

Rudahin D.S., Serenkov P.S.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The prospects of applying expert assessments in industry at the contemporary stage of development are discussed. The issue of the reliability of qualitative expert assessments is examined. The results of the analysis of the main stages and methods used in assessing the properties of the object are presented. A hypothesis about the main source of reliability losses in qualitative expert assessment is put forward, and a concept for solving this problem is proposed.

Keywords: organoleptic measurements, qualitative expert assessments, reliability.

*Адрес для переписки: Серенков П.С., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by*

Органолептический контроль качества играет ключевую роль в различных отраслях промышленности, включая производство продуктов питания, фармацевтику, деревообрабатывающую промышленность, машиностроение и др.

Как правило, оценка производится при помощи специально обученных людей – экспертов. Экспертная оценка опирается на человеческие органы чувств, позволяющие различать и оценивать вкус, запах, текстуру и другие сенсорные качества объекта. Органы чувств человека, включающие вкус, обоняние, осязание, зрение и слух, формируют комплекс сенсорных сигналов. Каждый сенсорный сигнал вносит свой вклад в общую интегральную оценку предпочтительности, которую невозможно воспроизвести с помощью измерительных приборов. Например, оценивая вкус некоторого блюда, опытный эксперт определяет не только основной вкус, но и учитывает сложное взаимодействие различных оттенков вкусов, текстур и запахов, которые и составляют суть интегральной оценки.

Известно, что методы экспертного оценивания разделяются на количественные и качественные.

В докладе сделан акцент на методы качественного оценивания, с которыми в первую очередь связаны проблемы обеспечения требуемой достоверности.

Методы качественного экспертного оценивания позволяют оценивать объект с точки зрения общего качества: вкус, запах, внешний вид, текстура и т. д.

Для анализа потерь достоверности в докладе приведен анализ этапов методов качественного экспертного оценивания:

1. Отбор и обучение экспертов. Качественная оценка предполагает, что человеческие органы чувств являются основными инструментами для оценки свойств объектов. Общеизвестно, что достоверность результатов органолептического контроля зависит от психофизического состояния испытателя, его опыта, владения методами органолептического анализа, уровня подготовки, сенсорных способностей, условия проведения испытаний. Сенсорными свойствами эксперта (чувствительность, воспроизводимость и др.) можно управлять в определенных пределах. Поэтому их обучают и аттестуют с помощью проверенных методик, которые регламентированы соответствующими стандартами.

2. Отбор и подготовка образцов для оценивания. Выборка образцов объекта должна быть репрезентативной. Репрезентативность определяется требованиями стандартов на статистический приемочный контроль. Подготовка образцов для исследования сугубо индивидуальна и требует наличия априорного опыта. Например, для оценки внешнего вида образцов необходимо обеспечить определенные условия освещения, которые минимизируют различия в цвете. Подготовка образцов является комплексным источником потерь достоверности получаемых оценок. Задача их минимизации частично решается стандартизацией условий подготовки. Однако множество скрытых

факторов условий подготовки остаются. Сегодня этот аспект экспертного оценивания определяется исключительно опытом экспертов.

3. Процесс получения экспертных оценок. Этап оценивания является ключевым. Источники возникновения потерь достоверности получаемых оценок, очевидно, определяются видами проведения процесса экспертного оценивания.

Существует ряд методов, реализующих процесс оценивания. В докладе рассмотрены наиболее распространенные:

– описательный анализ. Подготовленная группа экспертов строго описывает и количественно оценивает сенсорные признаки объекта, используя стандартную терминологию. Участники группы оценивают интенсивность признаков по определенной числовой шкале. Затем полученные данные подвергаются статистическому анализу для составления сенсорного профиля продукта;

– гедонистическое тестирование. Метод позволяет оценить общую приемлемость или предпочтительность объекта среди группы потребителей или обученной группы специалистов. Целью гедонистического тестирования является определение степени, в которой продукт нравится или не нравится потребителю. Метод помогает производителям продукции и службам контроля качества понять степень удовлетворенности потребителей.

Процесс тестирования реализуется в соответствии с общим алгоритмом. Участникам предоставляются образцы оцениваемого продукта. Эти образцы обычно подаются вслепую, т. е. участники не знают ни марки, ни конкретных характеристик образцов. Участники оценивают свое предпочтение к каждому образцу по определенной заранее шкале. Как правило, каждому баллу шкалы соответствует дискретное изменение степени предпочтительности эксперта к продукту.

Данные, полученные в ходе гедонистического тестирования, обычно представляют собой оценки предпочтений по каждому объекту. Эти оценки обрабатываются и анализируются с помощью статистических методов, например, для расчета среднего балла предпочтений и определения наличия существенных различий в предпочтениях между различными образцами объектов оценивания.

– сенсорное профилирование. Сенсорное профилирование направлено на создание сенсорной карты продукта путем одновременной оценки нескольких свойств. Обученные специалисты оценивают интенсивность и характеристики различных сенсорных признаков;

– анализ текстуры. Участники измеряют механические свойства продукта, такие как твердость, упругость, и т. п. Профили текстуры дают информацию для пищевой продукции, органолептики бытовых приборов, механизмов и т. д.

4. Анализ и интерпретация данных.

Результаты сенсорной оценки должны быть обработаны и преобразованы в числа определенного вида, который определяет смысловое содержание полученных оценок. Анализ данных предполагает соотнесение полученных числовых оценок с заданными априори критериями с использованием статистических методов для определения соответствия объектов требованиям. Принятие решения о несоответствии может потребовать корректирующих действий в отношении объекта или производственного процесса его получения.

Анализ литературных источников в отношении методов качественного экспертного анализа показал, что в большинстве случаев на этапе сбора экспертной информации реализуется процедура, в рамках которой эксперты при оценивании продукции отвечают на вопрос «сколько?». То есть, реализуется метод абсолютной оценки с использованием балльной шкалы оценок.

Балльные шкалы имеют низкую информативность, что обусловлено тем, что «единица измерения величины» отсутствует, строгие алгебраические операции недопустимы.

При использовании балльной шкалы необходимо корректно подобрать градацию характеристики качества по степени ее выраженности. Это очевидно является значимым источником достоверности получаемых экспертных оценок.

В основе теории измерений положена идея, что рассматривать стоит не столько свойства объектов, сколько отношения между объектами. Т. е. необходимо процесс сбора экспертной информации реализовать так, чтобы эксперт отвечал на вопрос не «сколько?», т. е. какова интенсивность выраженности свойства в объекте?», а «на сколько свойство одного объекта более выражено, чем у другого объекта?» или «во сколько раз свойство одного объекта более выражено, чем у другого объекта?». В докладе показано, что организация сбора данных в таком формате автоматически формирует экспертные оценки в шкале интервалов.

Дополнительным источником потерь достоверности экспертных оценок является их последующая статистическая обработка и математическая интерпретация, что возможно только для шкал интервалов и отношений.

Т. е. при последующем анализе и интерпретации данных для принятия решения в отношении соответствия объекта требованиям в случае организации процесса получения информации в формате «какова интенсивность выраженности свойства в объекте?» происходит необоснованная смена шкалы с балльной с на шкалу интервалов, что приводит к некорректному результатам оценивания.

Учет выявленных источников потерь достоверности результатов экспертного оценивания позволит повысить достоверность экспертного контроля и снизить риски некорректного принятия решений по результатам контроля.

УДК 618

РЕГИСТРАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОБЪЕКТОВ SATDET ДЛЯ СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ

Саечников И.В., Скакун В.В., Чернявская Э.А.

Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе описана регистрационная система объектов *SatDet* для семантического анализа спутниковых снимков. Система была обучена и протестирована на наборах спутниковых снимков *DIOR* и *XView*, и показала эффективность в решении прикладных задач анализа данных дистанционного зондирования.

Ключевые слова: глубокое обучение, регистрационная система, семантический анализ, спутниковые снимки, динамические объекты.

SATDET OBJECT REGISTRATION SYSTEM FOR SEMANTIC ANALYSIS OF SATELLITE IMAGES

Saetchnikov I., Skakun V., Tcherniavskaia E.

Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The paper describes the *SatDet* object registration system for semantic analysis of satellite images. The system has been trained and tested on *DIOR* and *XView* satellite image sets and has shown its efficiency in solving applied tasks of remote sensing data analysis.

Key words: deep learning, registration system, semantic analysis, satellite images, dynamic objects.

Адрес для переписки: Саечников И.В., пр. Независимости, 4, г. Минск, 220030, Республика Беларусь
e-mail: saetchnikovivan@gmail.com

Актуальность. Задача обнаружения и регистрации объектов стала крайне важной в последние годы благодаря широкому спектру ее применений в таких сферах, как биомедицина, робототехника, космические технологии, беспилотный транспорт и т. д. [1]. Эти задачи являются основой для решения более сложных проблем в области компьютерного зрения, таких как сопровождение целей и сегментация изображений. [2] Ранее использовавшиеся традиционные методы, такие как детектор Виолы-Джонса и гистограмма ориентированных градиентов (HOG), основывались на ручном определении признаков. [3; 4] Однако эти методы были характеризованы низкой скоростью обработки, ограниченной точностью и неэффективностью при работе с новыми наборами данных, особенно в регистрации небольших объектов (плотности менее 30×30 пикселей) [5]. В настоящее время сверточные нейронные сети стали ключевым инструментом для семантического анализа изображений, включая обнаружение и регистрацию объектов на аэрокосмических снимках [6–8].

В [9] была предложена сверточная сеть *RCNN* для анализа данных дистанционного зондирования (ДДЗ). Методы *ReDet* [10], *Oriented Bounding Boxes* [11] и *Box Boundary-Aware Vectors* [12] улучшали задачу регистрации и идентификации объектов на аэрокосмических снимках за счет поворота кадра предсказания и поворота детектора. Одна из серий сети *YOLO*, *TPH-YOLOv5* [13] за счет включения слоев обнаружения целей и использования *transformer prediction head* и *CBAM*

attention module улучшала регистрационную эффективность объектов на картах ДДЗ, что повышала эффективность обнаружения системой целей малого размера, однако пропускала объекты на изображениях с высокой разряженностью. Частично эту проблему решила *YOLO-Z* [14]: замена *PAFPN* на *Bi-FPN* и расширение слоя Neck обеспечило хорошее слияние мелких и средних признаков, но не было применимо сценариям с большой вариационностью размеров объектов.

Результаты. Для решения упомянутых задач, данная работа представляет оптимизированную систему регистрации для анализа объектов на спутниковых снимках с использованием *SatDet*, основанной на архитектуре *YOLOv7*.

В качестве основы для обучения использовались два датасета: *DIOR* и *xView* [15]. Из исходного набора данных *DIOR*, который включал 23 463 изображения размером 800×800 пикселей, содержащих в общей сложности 190 288 экземпляров объектов, в итоге были выбраны 3 класса: самолет, корабль и транспортное средство. В случае датасета *xView 1*, содержащего более 1 миллиона экземпляров объектов, полученных со спутников *DigitalGlobe* и *WorldView 3*, были выбраны одни из наиболее распространенных 5 классов: маленький автомобиль, грузовик, прицеп, грузовой грузовик, моторная лодка. На выходе был создан датасет из 2300 изображений, из которых формировались кадры для последующего использования в системе с разрешением 640×640 с использованием метода *Slicing Aided Hyper Inference*. В качестве методов аугментации использовались *Mosaic Augmentation* и *Random*

Shear Data Augmentation и *Random Blur Data Augmentation*. [16] В качестве оптимизатора был использован *Adam* со следующими параметрами: количество эпох (*epochs*) – 80, размер пакета (*batch*) – 32, терпимость (*patience*) – 50, коэффициент β_1 – 0,914, и весовое уменьшение (*weight decay*) – 0,0005.

Разработанная система регистрации была протестирована на обоих наборах данных спутниковых снимков, *DIOR* и *XView*. Эффективность детектирования варьировалась в соответствии с метрикой *AP* по классам для набора данных *DIOR*, где были получены следующие значения: 72,1 % для класса «самолет» (*airplane*), 87,6 % для класса «корабль» (*ship*), и 68,3 % для класса «транспортное средство» (*vehicle*), с усредненным по классам *mAP* 76 %. В случае набора данных *XView*, значения метрики *AP* по классам варьировались от 54,2 % для класса «грузовик» (*cargo truck*) до 61,6 % для класса «прицеп» (*trailer*), с усредненным *mAP* 59,5 %. Примеры детектирования объектов системой *SatDet* представлены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Пример регистрации объектов системой *SatDet*

Стоит отметить, что представленная регистрационная система может быть включена в системы отслеживания объектов на основе данных дистанционного зондирования, в том числе с таких носителей как беспилотные летательные аппараты, планеры и т. д. [17].

Литература

- Goswami, P.K. A Comprehensive Review on Real Time Object Detection using Deep Learning Model / P.K. Goswami, G. Goswami // 11th International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART). – 2022. – P. 1499–1502.
- Saetchnikov, I. Pattern recognition on aerospace images using deep neural networks / I. Saetchnikov, V. Skakun, E. Tcherniavskaia // IEEE 7th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace). – 2022. – P. 336–340.
- Kalal, Z. Tracking-Learning-Detection / Z. Kalal, K. Mikolajczyk, J. Matas // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – Vol. 34, № 7. – P. 1409–1422.
- Wojke, N. Simple online and realtime tracking with a deep association metric / N. Wojke, A. Bewley, D. Paulus // IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). – 2017. – P. 3645–3649.
- Buch, N.A. Review of Computer Vision Techniques for the Analysis of Urban Traffic / N. Buch, S.A. Velastin, J. Orwell // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – Vol. 12, № 3. – P. 920–939.
- Saetchnikov, I. Deep Neural Network-Based Dynamical Object Recognition and Robust Multiobject Tracking Technique for Onboard Unmanned Aerial Vehicle's Computer Vision-Based Systems / I. Saetchnikov, V. Skakun, E. Tcherniavskaia // IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems. – Vol. 4, № 3. – P. 250–256.
- Saetchnikov, I. Robust S-Y-biLSTM object tracking method for on-road objects shoot from an unmanned aerial vehicle / I. Saetchnikov, V. Skakun, E. Tcherniavskaia // IEEE 9th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace). – 2022. – P. 270–274.
- Saetchnikov, I. Efficient objects tracking from an unmanned aerial vehicle / I. Saetchnikov, V. Skakun, E. Tcherniavskaia // IEEE 8th International Workshop on Metrology for AeroSpace. – 2021. – P. 221–225.
- RCNN for small object detection on remote sensing images / W. Zhang [et al.] // Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – P. 2483–2486.
- A rotationequivariant detector for aerial object detection / J. Han [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 20–25 June 2021. – P. 2785–2794.
- Zand, M. Oriented bounding boxes for small and freely rotated objects / M. Zand, A. Etemad, M. Greenspan // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2022. – Vol. 60. – P. 1–15.
- Anchor-free arbitrary oriented object detector using box boundary-aware vectors / D. Yu [et al.] // IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. – 2022. – Vol. 15. – P. 2535–2545.
- TPH-YOLOv5: Improved YOLOv5 based on transformer prediction head for object detection on drone-captured scenarios / X.K. Zhu [et al.] // Proceedings of the 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops. – P. 2778–2788.
- YOLO-Z: Improving Small Object Detection in YOLOv5 for Autonomous Vehicles / A. Ben-jumea [et al.]. – 2022.
- Object recognition datasets and challenges: A review / A. Salari [et al.] // Neurocomputing. – 2022. – Vol. 495. – P. 129–152.
- Saetchnikov, I. Object Detection for Unmanned Aerial Vehicle Camera via Convolutional Neural Networks / I. Saetchnikov, E. Tcherniavskaia, V. Skakun // IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems. – 2021. – Vol. 2, № 2. – P. 98–103.
- Saetchnikov, I. biLSCCS: modular dynamical on-road objects trajectory prediction approach / I. Saetchnikov, V. Skakun, E. Tcherniavskaia // 2023 IEEE 10th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace). – 2023. – P. 131–135.

УДК 005.6

**ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОСАНКИ В РАМКАХ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА
Самохвал П.М., Врублевская Т.Н., Горошкевич П.В.**

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Современный образ жизни человека характеризуется малоподвижным укладом, долгими периодами сидения перед компьютером и недостатком физической активности. Эти факторы оказывают воздействие на физическое состояние человека, включая его осанку. В данном исследовании была проведена анализ роли систем мониторинга осанки (СМК) в оценке состояния осанки человека, а также рассмотрены основные методы оценки осанки и их значение для здоровья. Полученные результаты данного исследования могут быть полезны для специалистов, занимающихся оценкой осанки и внедрением систем мониторинга осанки в организациях, а также для всех, кто заботится о своем здоровье и стремится поддерживать правильное положение своей осанки.

Ключевые слова: осанка, оценка состояния, СМК.

**ASSESSMENT OF THE STATE OF POSTURE WITHIN THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM
Samokhval P., Vrublevskaya T., Goroshkevich P.**

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The modern human lifestyle is characterized by a sedentary way of life, prolonged sitting in front of a computer, and a lack of physical activity. All of these factors impact a person's health, including their posture. This study analyzes the role of Posture Monitoring Systems (PMS) in assessing a person's posture, as well as examines the fundamental methods of posture assessment and their significance for human health. The results of this research can be valuable for professionals involved in posture assessment and the implementation of PMS in organizations, as well as for everyone concerned about their health and wanting to maintain proper posture.

Key words: posture, condition assessment, QMS.

*Адрес для переписки: Самохвал П.М., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: p.samokhval@yandex.by*

Оценка осанки позволяет анализировать положение и форму тела человека в пространстве и выявлять потенциальные нарушения и деформации позвоночника, которые могут привести к заболеваниям опорно-двигательного аппарата. В рамках системы менеджмента качества (СМК), оценка осанки включает в себя использование специальных методов и техник, таких как антропометрические измерения, визуальная оценка, функциональные тесты и другие, чтобы получить полную картину состояния осанки и разработать оптимальную стратегию коррекции.

Система менеджмента качества представляет собой универсальный подход к обеспечению качества продукции или услуг в организации [1]. Она включает в себя ряд этапов, таких как планирование, организация, контроль, управление и улучшение, которые необходимо пройти для обеспечения качества продукции или услуги. В контексте оценки осанки, СМК может помочь установить критерии и стандарты для оценки, разработать процедуры для ее проведения, а также способствовать разработке инструментов для измерения и оценки осанки, а также обучению специалистов, проводящих оценку [2].

Одним из ключевых преимуществ использования СМК при оценке осанки является повышение точности и надежности оценки. Это достигается благодаря разработке стандартов и процедур, а

также использованию профессионального оборудования, что позволяет получить более точные и объективные данные о состоянии осанки.

Применение СМК при оценке состояния осанки предоставляет возможность наблюдать за изменениями в осанке со временем. Установление стандартов и процедур позволяет проводить регулярные измерения и сравнивать результаты, что способствует выявлению изменений в состоянии осанки и принятию мер для их коррекции. Таким образом, использование СМК в оценке состояния осанки повышает точность и объективность оценки, а также обеспечивает ее надежность и повторяемость. Это имеет особое значение при проведении оценки в клинических условиях, где требуется точная информация для принятия решений о лечении.

Более того, применение СМК в оценке состояния осанки оптимизирует процесс оценки и снижает риски ошибок. Благодаря установленным стандартам и процедурам можно сократить время, затрачиваемое на проведение оценки, и уменьшить вероятность ошибок, связанных с субъективностью или неправильной интерпретацией данных.

Использование СМК при оценке состояния осанки также способствует улучшению качества обучения специалистов, проводящих оценку. Разработка процедур и стандартов помогает стандартизировать обучение и обеспечивает единый подход к проведению оценки.

В конечном итоге, применение СМК при оценке состояния осанки может значительно улучшить качество жизни пациентов. Предотвращение и коррекция нарушений осанки могут привести к снижению боли в спине, увеличению подвижности и улучшению общего здоровья. Таким образом, использование СМК при оценке состояния осанки предоставляет множество преимуществ, которые полезны как для пациентов, так и для специалистов, проводящих оценку. Однако следует помнить, что эффективность СМК зависит от правильного применения ее принципов и методов, а также от квалификации специалистов, проводящих оценку.

Существует несколько методов оценки состояния осанки:

1. **Визуальный осмотр.** Этот метод является простым и позволяет выявить выраженные деформации позвоночника, такие как кифоз или лордоз, а также сколиоз.

2. **Фотограмметрия.** Основана на измерении углов и расстояний на фотографиях пациента и может использоваться для оценки осанки.

3. **Бесконтактный лазерный метод.** Этот метод основан на использовании лазерного луча для измерения высоты точек на теле пациента.

4. **Электрмиография.** Включает использование электрокимографических датчиков, размещенных на теле пациента.

5. **Компьютерная томография.** Основана на измерении углов и расстояний на изображениях внутренних органов и тканей пациента.

Выбор конкретного метода оценки осанки зависит от целей исследования, доступного оборудования и квалификации специалистов. Важно выбирать наиболее подходящий метод для получения точных результатов.

Разработка системы менеджмента качества (СМК) для оценки состояния осанки представляет собой важный этап в обеспечении точности и надежности этого процесса. Этот процесс включает определение целей и требований, анализ процессов, разработку стандартов и процедур, обучение специалистов, внедрение СМК и анализ результатов.

Существует несколько стандартов и руководств, описывающих применение СМК для оценки осанки, включая международный стандарт *ISO 9001*. В рамках этого стандарта рассматривается необходимость разработки процедур, документов и инструкций по оценке осанки и их внедрения в здравоохранение и другие отрасли.

Руководство *ICF (International Classification of Functioning, Disability and Health)* является важным инструментом, разработанным Всемирной

организацией здравоохранения (ВОЗ) для классификации и оценки функционирования, инвалидности и здоровья людей. Эта система предоставляет стандарты и терминологию, которые позволяют специалистам в области здравоохранения описывать и анализировать различные аспекты здоровья и функционирования пациентов. *ICF* включает в себя разделы, описывающие функциональные возможности, ограничения, факторы окружающей среды и личные факторы [3].

Руководство для специалистов по физической терапии, разработанное ВОЗ и Международной федерацией физической терапии, фокусируется на оценке и лечении пациентов с заболеваниями опорно-двигательного аппарата. Оно содержит подробные инструкции по оценке осанки и других функциональных параметров, а также описывает методы лечения и реабилитации для таких пациентов. Это руководство помогает физическим терапевтам и другим специалистам определить состояние пациента, разработать индивидуальные планы лечения и мониторить его прогресс.

Оба эти стандарта и руководства играют важную роль в улучшении качества здравоохранения и профилактике заболеваний опорно-двигательного аппарата. Они обеспечивают структурированный подход к оценке состояния пациентов, что помогает определить оптимальные методы лечения и реабилитации. Такие стандарты способствуют стандартизации процессов и повышению качества ухода за пациентами, что, в конечном итоге, может улучшить их жизненное качество и результаты лечения [4].

Таким образом, СМК для оценки состояния осанки является важным инструментом в практике здравоохранения. Ее применение может помочь улучшить качество оказания медицинских услуг, повысить удовлетворенность пациентов и снизить риски возникновения ошибок и нежелательных последствий.

Литература

1. International Organization for Standardization. (2015) : *ISO 9001:2015 Quality management systems – Requirements*.
2. International Organization for Standardization. (2019) : *ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use*.
3. International Organization for Standardization. (2019) : *ISO 41001:2018 Facility management – Management systems – Requirements with guidance for use*.
4. World Health Organization. (2018) : world report on ageing and health.

УДК 005.6

КОНЦЕПЦИЯ КАЧЕСТВА ЖИЗНИ, СВЯЗАННОГО СО ЗДОРОВЬЕМ
Самохвал П.М., Врублевская Т.Н., Пешко П.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Термин «Качество жизни» используется в различных науках, каждая из которых пользуется собственной трактовкой. В медицине используется концепция качества жизни, связанного со здоровьем. В данной статье описывается на каких факторах базируется эта концепция и насколько она важна при том, что на качество жизни оказывают влияние самые разнообразные факторы.

Ключевые слова: качество жизни, здоровье, медицина.

CONCEPT OF HEALTH-RELATED QUALITY OF LIFE
Samokhval P., Vrublevskaya T., Peshko P.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract: The term "Quality of life" is used in various sciences, each of which has its own interpretation. Medicine uses the concept of health-related quality of life. This article describes what factors this concept is based on and how important it is, given that the quality of life is influenced by a wide variety of factors.

Key words: quality of life, health, medicine.

Адрес для переписки: Самохвал П.М., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: p.samokhval@yandex.by

В XXI веке с каждым днем у людей появляется все больше вопросов о том, как сделать собственную жизнь лучше. Для обычного человека качество жизни отражает степень удовлетворенности его потребностей. На уровне государства оно рассматривается как цель развития человека, государства, международного сообщества. Улучшение качества жизни граждан в Беларуси закреплено на законодательном уровне в стратегии национального развития до 2030 года, утвержденная в постановлении совета министров Республики Беларусь от 2 мая 2017 г. № 10.

Сам термин «Качество жизни» носит междисциплинарный характер. Он используется в различных научных отраслях, каждая из которых пользуется своей трактовкой, выдвигая на первый план определенные черты. Изучение понятия «Качество жизни» базируется на различных аспектах, таких как, философский, духовный, религиозный, медицинский, экономический, правовой, социологический, технический, экологический, географический.

Специалисты медицинского профиля уделяют большое внимание показателям состояния физического и психического здоровья. Критерии оценки качества жизни можно разделить на субъективные и объективные. К первой группе можно отнести такие показатели, как воспринимаемое здоровье, удовлетворенность здоровьем и т. п., а ко второй – уровень физических ограничений, тяжесть течения различных заболеваний.

Термин «Качество жизни, связанное со здоровьем» занял свою обширную нишу в современной медицине. Впервые он был предложен в 1982 г. с

целью выделить аспекты качества жизни, относящиеся к состоянию здоровья и заботы о нем среди широкой общей концепции качества жизни. В 1995 г. была дана формулировка этого понятия, согласно которой связанное со здоровьем Качество жизни – это оценка людьми субъективных факторов, определяющих их здоровье на данный момент, забота о здоровье и действия, способствующие его укреплению; умение следовать жизненным целям, сохраняя собственное благополучие [1].

Внимание к качеству жизни, связанному со здоровьем, вероятнее всего связано с развитием доказательной медицины. Она делает акцент на исходах, длительности жизни, качестве жизни и других объективных показателях.

Здоровье человека – это состояние организма, характеризующееся способностью адаптироваться к различным условиям жизни и противостоять негативному влиянию извне. Оно связано с сохранением и укреплением психических и физиологических качеств человека, зависит от уровня работоспособности и оказывает влияние на продолжительность жизни. Здоровье человека также зависит от его способности анализировать сведения и противостоять негативному информационному потоку, который оказывает влияние на каждого человека.

Здоровье человека с точки зрения науки теперь находится в числе приоритетных вопросов, которые принято считать глобальными. Большое количество людей стало уделять больше внимания своему здоровью и тому, как оно влияет на Качество жизни. Средний срок продолжительности жизни

увеличился в связи с ростом уровня медицинских знаний и технологий, с повышением уровня образованности населения и осведомленности в этой сфере, вследствие чего у большей части населения развился интерес к здоровому образу жизни и профилактике заболеваний.

Благодаря научно-техническому прогрессу в течение относительно небольшого временного отрезка были достигнуты большие успехи в науке и технике. С развитием медицины человечество улучшает свои возможности, подтверждая теории о том, что наши возможности неограниченны.

Известно, что только здоровый человек, который заботится о своем самочувствии, психологическом состоянии, занимается повышением умственной и физической работоспособности имеет возможность вести активную жизнь, успешно справляясь с профессиональными и бытовыми трудностями.

Согласно подходу Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), качество жизни рассматривается как сложноорганизованная структура, которая включает в себя восприятие личностью собственного физического и психологического состояния, построение своих взаимоотношений с другими людьми, а также своего отношения к окружающей среде. Отсюда следует, что при данном подходе дается оценка качеству жизни, связанному со здоровьем.

ВОЗ были разработаны основополагающие критерии «Качества жизни» и их составляющие:

1. Физические (сила, энергия, усталость, боль, дискомфорт, сон, отдых). Важную роль в качестве жизни играет физическое здоровье. Оно состоит из общего состояния физического здоровья, наличия заболеваний, нарушений функций организма, а также уровня физической активности и уровня физиологического комфорта. Уровень физического здоровья человека оказывает влияние на способность выполнять ежедневные дела, участвовать в социальной жизни, на настрой и общее благополучие.

2. Психологические (эмоции, мышление, изучение, запоминание, концентрация, самооценка, внешний вид, негативные переживания). Еще одним важным аспектом качества жизни является психологическое здоровье. Оно состоит из эмоционального состояния, психического благосостояния, уровня качества сна, способности справляться с эмоциональными и психологическими трудностями, а также уровня стресса и тревожности. Хорошее психологическое здоровье способствует позитивному отношению к жизни, улучшает отношения с окружающими и повышает общее качество жизни.

3. Уровень независимости (повседневная активность, работоспособность, зависимость от лечения и

лекарств). На здоровье человека также оказывает влияние его физическая активность, способность контролировать баланс между работой и отдыхом, концентрировать внимание на собственном физиологическом состоянии, управлять своими желаниями.

4. Общественная жизнь (личные взаимоотношения, общественная ценность субъекта, сексуальная активность). Качество жизни зависит также от способности людей строить здоровые взаимоотношения с окружающими его людьми, нести пользу обществу, улучшая при этом свое собственное эмоциональное состояние.

5. Окружающая среда (благополучие, безопасность, быт, обеспеченность, доступность и качество медицинского и социального обеспечения, доступность информации, возможность обучения и повышения квалификации, досуг, экология). Экологическое здоровье включает в себя качество окружающей среды, в которой мы находимся, живем, работаем и проводим свое время. Важное значение для качества жизни имеют чистый воздух, вода и почва, доступность экологически безопасных условий проживания и работы [2].

На состояние здоровья населения оказывают большое влияние доступность медицинской помощи. Для повышения общего состояния здоровья людей проводятся оздоровительные мероприятия, агитация людей на участие в них. Большое значение придается культуре здоровья и ответственности каждого человека за свое собственное состояние. Также под особым вниманием находится уровень осведомленности населения о профилактике и проявлениях заболеваний. И это важно учитывать, когда составляется оценочное суждение о качестве жизни.

В настоящее время созданы эффективные методики оценки качества жизни, получившие международное признание, накоплено много информации о влиянии заболеваний на показатели качества жизни [3].

Концепция качества жизни, связанного со здоровьем, не теряет своей актуальности, несмотря на доказанность влияния социальных факторов на качество жизни.

Литература

1. Комлева, Н.Е. Качество жизни у больных с болью в спине / Н.Е. Комлева, И.В. Заикина // Медицина труда и промышленная экология. – 2015. – № 9. – С. 72.
2. Краткий опросник ВОЗ для оценки качества жизни [Электронный ресурс]. – Режим доступа http://www.who.int/substance_abuse/research_tools/whoqolbref/ru.
3. Калашников, К.Н. Доступность и качество помощи в контексте модернизации здравоохранения / К.Н. Калашников, О.Н. Калачикова // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2014. – № 2(32). – С. 130–142.

УДК 621.31/.36

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ
ИЗМЕРЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ
НА ОСНОВЕ ПЕРВИЧНОЙ РЕФЕРЕНТНОЙ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ**

Гуревич В.Л.¹, Хейфец М.Л.², Винтов Д.А.²

¹Белорусский национальный технический университет

²ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Проанализирована проблема достоверности измерений и метрологической прослеживаемости механического напряжения как характеристики напряженно-деформированного состояния. Предложено применение первичной референтной методики измерений для воспроизведения единицы величины – механического напряжения.

Ключевые слова: механическое напряжение, метрологическая прослеживаемость, первичная референтная методика измерений.

**ENSURING METROLOGICAL TRACEABILITY
MECHANICAL STRESS MEASUREMENTS
BASED ON A PRIMARY REFERENCE MEASUREMENT PROCEDURE**

Hurevich V.L.¹, Kheifets M.L.², Vintov D.A.²

¹Belarusian National Technical University

²Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The problem of measurement reliability and methodological traceability of mechanical stress as a characteristic of the stress-strain state is analysed. It is proposed to use a primary reference measurement procedure to reproduce the unit of pressure – mechanical stress.

Key words: mechanical stress, metrological traceability, primary reference measurement procedure.

*Адрес для переписки: Гуревич В.Л., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: valery.hurevich@gmail.com*

Измерение механического напряжения как характеристики напряженно-деформированного состояния различных конструкций, а также изделий машиностроения является важнейшим аспектом обеспечения безопасности, а также оценки их ресурса и долговечности. Оценка механического напряжения осуществляется косвенными измерениями на основании прямых измерений других величин, которые функционально связаны с механическими напряжениями, то есть его определяют методами неразрушающего контроля на основании эмпирической зависимости измеряемого параметра и последующего преобразования измеренных величин физических параметров в численное значение механического напряжения [1].

Для существующих методов неразрушающего контроля (магнитный, ультразвуковой, рентгеновский) внутренних механических напряжений в материале необходима отдельная калибровка для последующего преобразования измеренных величин физических параметров в численное значение механического напряжения. Поэтому, калибровка прибора неразрушающего контроля является ключевым этапом в оценке величины напряженно-деформированного состояния. Как правило, обычной практикой является экспериментальное установление на разрывной машине

зависимости измеряемого параметра (например, акустической скорости) по отношению к величине механического напряжения. Как следствие, результаты определения механического напряжения нельзя соотнести с основой для сравнения в виде эталона физической величины. При этом в рамках современных методик при калибровке измеряемая величина физических параметров, зависящая от механического напряжения, не является независимой частью образца, а зависит от микроструктуры и состояния поверхности. Последующее «слепое» определение величины напряжения (деформации) методами неразрушающего контроля в материале с неизвестной микроструктурой приводит к значительной неопределенности ее результатов.

Для получивших в настоящее время методов определения механических напряжений (рентгеновский, ультразвуковой, магнитный, вихретоковый) применяются средства измерений, которые не прослеживаются к эталону, воспроизводящему соответствующую величину – механическое напряжение.

Для обеспечения достоверности результатов измерения механического напряжения ключевой проблемой становится формирование подхода и методологии к воспроизведению единицы величины механического напряжения, а также вопрос

обеспечения метрологической прослеживаемости, в соответствии с которой результат измерения может быть соотнесен с основой для сравнения через документированную неразрывную цепочку калибровок, каждая из которых вносит вклад в неопределенность результата измерения, включая оценку бюджета неопределенности.

Таким образом, для обеспечения сопоставимости результатов измерений механического напряжения при анализе напряженно-деформированного состояния актуальным является разработка первичной референтной методики измерений (ПРМИ), которая позволяет получать результаты измерений без их прослеживаемости к единицам величин того же рода, то есть без сравнения с эталоном единицы величины того же рода [2]. При этом применение ПРМИ реализуется на одном уникальном комплекте оборудования.

Особенностью ПРМИ является построение метрологической иерархии, вершиной которой и является ПРМИ, которая позволяет получать результаты измерения величины без их прослеживаемости к эталону единицы величины того же рода. Разработка ПРМИ осуществляется для метрологического обеспечения так называемых «методозависимых» величин, определяемых по эмпирическим методиками измерений, к которым относится измерение механического напряжения.

Целью данной работы является решение задачи метрологического обеспечения измерений механического напряжения на основании комплекса теоретических и экспериментальных исследований, который должен включать:

- выбор методических решений, подготовка оборудования и средств измерений;
- установление последовательности и содержания операций при подготовке и проведении измерений;
- оценивание показателей точности на основе теоретических и экспериментальных исследований;

- разработка и экспериментальное опробование документированной процедуры контроля показателей точности выполняемых измерений;

- представление полного бюджета неопределенности;

- подтверждение реализуемости ПРМИ для оценки напряженно-деформированного состояния;

- подтверждение наивысшей точности результатов измерений, обеспечиваемой данной ПРМИ.

Для подтверждения метрологической прослеживаемости должна быть сформирована иерархическая схема, демонстрирующая конкретный порядок передачи единицы величины от ПРМИ другим методикам (методам) измерений, а также средствам измерений с более низкими показателями точности.

Заключение. Создание первичной референтной методики измерений механического напряжения позволит создать систему воспроизведения и передачи данной единицы величины. Представленные в настоящей статье теоретические и методические основы следует учитывать при ее разработке.

Метрологическое обеспечение измерения механического напряжения должно опираться на результаты теоретических и экспериментальных исследований и решаться как комплексная задача, включающая разработку и исследование эталонного оборудования, создание механизма передачи единицы величины и установление цепи метрологической прослеживаемости через калибровочную иерархию, а также разработку технических нормативных правовых актов.

Литература

1. Винтов, Д.А. Исследование методом шума Баркгаузена двухосного напряженно-деформированного состояния в стальных образцах / Д.А. Винтов, В.Л. Венгринович // *Неразрушающий контроль и диагностика*. – 2022. – № 4. – С. 28–40.
2. Метрология. Основные термины и определения : РМГ 29-2013.

УДК 005.1

МЕТОДЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
Горошкевич П.В., Врублевская Т.Н., Самохвал П.М.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрена проблематика принятия решений. Выявлены наиболее эффективные методы принятия решений.

Ключевые слова: методы принятия решений.

DECISION MAKING METHODS
Goroshkevich P., Samokhval P., Vrublevskaia T.

Belarussian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The problems of decision making are considered. The most effective methods of decision-making have been identified.

Ключевые слова: decision making methods.

Адрес для переписки: Самохвал П.М., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: p.samokhval@yandex.by

Сознательная жизнь человека – это ряд решений, принимаемых в отношении многочисленных вопросов и задач, которые ставит перед ним общество и индивидуальные потребности. Однако не все решения приводят к желаемому результату. Люди сталкиваются с неопределенностью, недостатком информации и многими другими факторами, влияющими на процесс принятия решений.

Принятие решений – это сложный и многогранный процесс, включающий анализ ситуации, оценку рисков, выбор наилучшего варианта и, в конечном счете, принятие решения [1]. Важно понимать, что подход к принятию решений у каждого человека свой и зависит от опыта, знаний и личных убеждений. Для того, чтобы принять правильное решение, люди должны учитывать все факторы, которые могут повлиять на процесс принятия решения, и стараться оценить ситуацию как можно более объективно. К таким факторам относятся личные убеждения и ценности, опыт и знания, социальное окружение, неопределенность и риск, время и доступность информации.

Существует несколько подходов к поиску оптимального решения. Одним из них является логический подход. Формально-логические методы принятия решений основаны на использовании логических законов рассуждений, которые логически выводятся из предшествующих знаний без непосредственного обращения к опыту. Фундаментальным требованием логики является обязательность связанного и последовательного рационального мышления.

Другим методом принятия решений является математический метод. В этом методе лицо, принимающее решение, должно определить критерии оценки возможных решений проблемы. К таким критериям относят затраты, прибыль, повышение производительности труда, предотвращение несчастных случаев и т. д. Успех или

неудача решения проблемы зависит от разветвления различных возможных вариантов. Рекомендуется не оставлять без внимания важные варианты, включая вариант «ничего не делать». Для анализа и сравнения альтернатив, а также для выбора наилучшей альтернативы часто используются математические методы, такие как оптимизация и прогнозирование. Реализация выбранной альтернативы предполагает выполнение указанных в ней действий. Принятие решения требует проверки результатов его реализации и устранения ошибок в случае необходимости. Принятие решений всегда ограничено объективными условиями, связанными с затратами, трудовыми ресурсами, временем, технологией и наличием информации. Принятие решений не дает результатов, поскольку оптимальное решение принимается для одного компонента системы, а неоптимальное – для всей системы. Выбор метода анализа зависит от условий принятия решения. Эти условия ранжируются по степени их точности и надежности. Определенность, риск и неопределенность – три основные категории условий [2]. В детерминированных условиях выбранное решение имеет наибольшее (наименьшее) значение главного критерия. Фактор риска находится между полюсами определенности и неопределенности.

Кроме того, к методам принятия решений можно отнести методы активизации мыслительного процесса. К таким методам относятся метод мозгового штурма, метод деловой игры, метод идейного совещания и метод принятия решений экспертами.

Во время мозгового штурма процесс генерации идей подобен лавине. Выдвигаются идеи, которые вызывают творческий или критический отклик и вдохновляют на новые идеи. Ценность новых идей, полученных в результате групповой

работы, на 70 % выше, чем сумма индивидуальных идей. Существует несколько способов проведения мозгового штурма: одиночный, групповой, письменный, дуэтный и обратный, а также синектический (объединяющий разные элементы). Синектика основана на методе мозгового штурма и характеризуется использованием постоянных групп профессионалов из разных дисциплин. Перед началом работы рекомендуется, чтобы члены синергетической группы не понимали сути рассматриваемой проблемы. Это помогает не поддаваться привычным стереотипам мышления и лучше преодолевать инерцию мышления. В результате мыслительная деятельность людей оказывается более продуктивной в новых и незнакомых условиях [3].

Метод идейного совещания – это вид коллективного творчества. От мозгового штурма он отличается главным образом темпом работы, принимая форму совещания, на котором при разработке идей учитывается доброжелательная критика в виде замечаний и отзывов. Считается, что критика даже повышает ценность предлагаемых идей. Все представленные идеи фиксируются в протоколе совещания, но их авторы не указываются. Результат идейной сессии должен быть результатом коллективных усилий.

Деловая игра – это метод моделирования управления и других решений в различных ситуациях (производственных и непроизводственных), когда группа или один человек с помощью компьютера играют в игру по заданным правилам. Возникает множество, казалось бы, непроизвольных ситуаций. Фактически, благодаря конкретным методам обсуждения появляется ряд других решений.

Суть экспертных методов заключается в использовании опыта работы, эрудиции и интуиции высококвалифицированных специалистов, способных находить решения в ситуациях сложной формализации и недостаточности информации. Методы экспертной оценки позволяют оценить качественные характеристики исследуемого объекта. При этом реализуются возможности системного подхода, поскольку информация, которой обладает группа экспертов, используется комплексно.

При системном подходе к принятию решений нельзя исключать эвристические методы (догадки, озарения и т. д.); над проблемой можно работать годами, а идея может возникнуть мгновенно в результате понимания.

Системный подход заключается в следующем: принятие решения – это не начальный, а завершающий этап творческого цикла, который начинается с выявления системы, определяющей проблемную ситуацию, затем продолжается выявление закономерностей, по которым эта система разработана, и только потом наступает этап выбора способа принятия решения; возможность выбора методов принятия решений обеспечивается за счет использования структурно-функционального подхода; процесс принятия решений невозможно отделить от «человеческого фактора», от психологических и социально-экономических факторов, от личностных качеств, в частности смелости и способности привносить в решение определенную степень риска.

Принятие правильных решений – это не только наука, но и интуиция, опыт, чутье, все то, что называется словом «искусство». Высшая мудрость рождается в их единстве.

Таким образом, процесс принятия решений является наиболее важной составляющей человеческой жизни. Каждое принятое решение может повлиять на жизнь человека и его успех в той или иной области.

Умение принимать правильные решения является ключевым фактором для достижения успеха. Принимая, верные, правильные решения, можно достичь желаемых результатов и значительно улучшить качество жизни, в противном случае неверные решения могут привести к негативным последствиям.

Правильное принятие решений требует учета целей, приоритетов, последствий, рисков и интуиции. Кроме того, необходимо учитывать человеческое внимание, анализ и самоконтроль. Для выбора верного решения необходимо учитывать все факторы, которые могут повлиять на окончательный результат.

Литература

1. Капица, С.П. Синергетика и прогнозы будущего // С.П. Капица, С.П. Курдюмов, Г.Г. Малинецкий – М. : Эдиториал УРСС, 2001. – 285 с.
2. Дегтярев, Ю.Н. Системный анализ и исследование операций: учебник / Ю.Н. Дегтярев. – М. : Высш. шк., 1996. – 335 с.
3. Корнилова, Т.В. Психология риска и принятие решения : учебное пособие для вузов / Т.В. Корнилова. – М. : Аспект Пресс, 2003. – 286 с.

УДК 620.178.1

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ТОЛЩИНЫ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ Сандомирский С.Г., Валько А.Л., Руденко С.П.

ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Высоконагруженные детали машин изготавливают из сталей, подвергаемых поверхностному упрочнению – цементации и закалке. Важным параметром упрочненного слоя является его эффективная толщина h_{ef} – расстояние от поверхности изделия до зоны с твердостью $50HRC$. Достоверность определения h_{ef} снижают полосчатость металла и погрешность измерения твердости. В докладе для определения h_{ef} использованы результаты измерения твердости $HV0,5$ в расширенном диапазоне анализируемой зоны, которые были пересчитаны в значения твердости HRC по формуле, рекомендованной стандартом. Распределение твердости HRC в области измерения аппроксимированы полиномом второй степени, использованным для определения h_{ef} . Показано, что метод исключает влияние полосчатости металла и погрешности измерений твердости на результат определения h_{ef} .

Ключевые слова: упрочнение, цементация, твердость, эффективная толщина упрочненного слоя.

METHOD FOR DETERMINING THE EFFECTIVE THICKNESS OF THE HARDENED LAYER Sandomirski S., Val'ko A., Rudenko S.

Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Highly loaded machine parts are made of steels subjected to surface hardening – carburizing and hardening. An important parameter of the hardened layer is its effective thickness h_{ef} – the distance from the product surface to the zone with hardness $50HRC$. The reliability of h_{ef} determination is reduced by metal banding and hardness measurement error. In the report, the results of $HV0,5$ hardness measurements in the extended range of the analyzed zone were used to determine h_{ef} and converted to HRC hardness values using the formula recommended by the standard. The HRC hardness distributions in the measurement area were approximated by the second degree polynomial used to determine h_{ef} . It is shown that the method excludes the influence of metal banding and hardness measurement error on the result of h_{ef} determination.

Keywords: hardening, cementing, hardness, effective thickness of the hardened layer.

Адрес для переписки: Сандомирский С.Г., ул. Академическая, 12, г. Минск, 220012, Республика Беларусь
e-mail: sand_work@mail.ru

Для длительной и надежной эксплуатации мобильных машин важна твердость в зоне действия максимальных глубинных контактных напряжений, возникающих на некотором расстоянии от поверхности зубчатых колес [1]. Цементация (насыщение поверхностного слоя стали углеродом) с последующей закалкой – основной метод упрочнения стали на необходимую глубину, который формирует в стали поверхностный слой с концентрацией углерода, убывающей от поверхности к сердцевине детали [2]. При закалке цементированных изделий в поверхностном слое образуется высокоуглеродистый мартенсит с высокой твердостью и износостойкостью, а в сердцевине изделия сохраняется низкая твердость и высокая вязкость (рисунок 1). Для обеспечения требуемого ресурса зубчатых колес регламентируют поверхностную твердость и эффективную толщину h_{ef} цементированного слоя [3]. За h_{ef} после закалки принимают расстояние от поверхности до зоны слоя с твердостью $50HRC$ [3; 4]. Для определения h_{ef} используют результаты измерений распределения твердости $HV0,5$ на шлифах по глубине h цементированного слоя образцов.

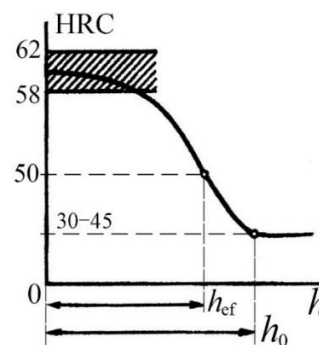


Рисунок 1 – Схема изменения твердости HRC в цементированной стали от расстояния h до поверхности насыщения углеродом; h_{ef} и h_0 – эффективная и полная толщина слоя

Но точность такого определения h_{ef} недостаточна из-за погрешности измерений $HV0,5$ и наличия в области измерений полосчатой структуры. Повышение количества измерений твердости в указанной зоне, рекомендованное стандартной методикой [4], не повышает достоверность определения h_{ef} .

В докладе разработан метод повышения достоверности определения h_{ef} упрочненного слоя в стали после цементации и закалки.

Использовали то, что увеличение диапазона изменения величины при постоянной погрешности измерения приводит к увеличению коэффициента корреляции между результатами измерения и истинными значениями величины [5]. Поэтому аппроксимация изменения твердости HRC от расстояния h до поверхности позволит получить более достоверную зависимость $HRC(h)$ при проведении измерений в более широком диапазоне изменения h .

Повышение достоверности определения h_{ef} при использовании такого подхода в [6] показано на образце из стали 18ХГТ, подвергнутом цементации и закалке по режимам, регламентированном производством зубчатых колес силовых передач [3]. Распределение микротвердости $HV0,5$ по глубине цементированного слоя образца измеряли на шлифе при нагрузке 4,9 Н. Измеренные значения микротвердости $HV 0,5$ были пересчитаны в единицы твердости HV (при нагрузке 30 кг) и в значения твердости HRC по формуле, рекомендованной международным стандартом.

Результаты пересчета измеренных значений микротвердости $HV0,5$ в значения твердости HRC в практически важном для определения h_{ef} диапазоне изменения значений твердости HRC модельного образца приведены на рисунке 2. Отметим, что результаты определения значений HRC образца при заданной величине h могут существенно отличаться для двух независимых измерений (рисунок 2, а и б).

Полученные зависимости $HRC(h)$ были аппроксимированы полиномами:

$$HRC = 12,662 \cdot h^2 - 59,55 \cdot h + 117,46, \quad (1)$$

$$HRC = 13,052 \cdot h^2 - 60,597 \cdot h + 118,01. \quad (2)$$

По [4] (рисунок 1), значению h_{ef} стали после закалки соответствует значение 50 HRC . На основании (1) и (2), для определения h_{ef} образца были получены квадратные уравнения:

$$h_{ef}^2 - 4,703 \cdot h_{ef} + 5,3278 = 0, \quad (3)$$

$$h_{ef}^2 - 4,6427 \cdot h_{ef} + 5,2107 = 0. \quad (4)$$

Результаты решения уравнений (3) и (4) составили: $h_{ef} = 1,902$ мм и $h_{ef} = 1,899$ мм. Они отлича-

ются друг от друга на 0,003 мм, что меньше допустимой по [4] погрешности 0,02 мм определения h_{ef} . При этом полосчатость образца и погрешность каждого измерения твердости никуда не делись. Но, благодаря примененному методу, эти погрешности практически не влияют на определение h_{ef} .

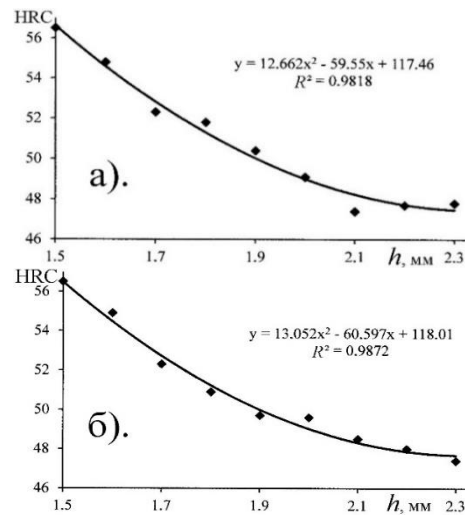


Рисунок 2 – Результаты двух измерений (а, б) распределения твердости HRC по толщине h цементированного слоя образца после закалки

Литература

1. Руденко, С.П. Применение перспективных экономно-легированных марок сталей для зубчатых колес мобильных машин / С.П. Руденко, А.Л. Валько, С.Г. Сандомирский // Механика машин, механизмов и материалов. – 2019. – № 4. – С. 61–69.
2. Сусин, А.А. Химико-термическое упрочнение высоконапряженных деталей / А.А. Сусин. – Минск : Белорусская наука, 1999. – 175 с.
3. Руденко, С.П. Сопротивление контактной усталости цементованных зубчатых колес из хромоникелевых сталей / С.П. Руденко, А.Л. Валько // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2017. – № 1. – С. 58–62.
4. Поверхностно-упрочненные слои металлических деталей. Методы измерения толщины : СТБ 2307-2013. – Минск : Госстандарт, 2013. – 16 с.
5. Сандомирский, С.Г. Влияние точности измерения и диапазона изменения физической величины на коэффициент корреляции / С.Г. Сандомирский // Измерительная техника. – 2014. – № 10. – С.13–17.
6. Sandomirski, S.G. Methodology for Determining the Effective Thickness of the Cemented Layer of Steel / S.G. Sandomirski, A.L. Val'ko, S.P. Rudenko // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14, № 2. – С. 145–151.

УДК 62-52

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА НОРМИРОВАНИЯ И КООРДИНАТНОГО КОНТРОЛЯ В РАМКАХ ИНДУСТРИИ 4.0

Сенюта В.В., Гомма М.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Все виды промышленности переходят к концепции автоматизации Индустрия 4.0, которая обеспечивает лучшую гибкость, повышенную эффективность и высокое соотношение работы и затрат в ограниченные сроки. Применение параметрического программирования для выполнения измерений позволяет решить широкий спектр задач автоматизации измерений и снизить количество необходимых планов контроля для всей номенклатуры деталей.

Ключевые слова: процесс нормирования, координатный контроль, Индустрия 4.0, автоматизация процесса нормирования.

AUTOMATISATION OF THE PROCESS OF RATIONING AND COORDINATE CONTROL IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0

Senyuta V.V., Homma M.A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. All types of industry are moving towards the automation concept of Industry 4.0, which provides better flexibility, increased efficiency and a high work-to-cost ratio in a limited timeframe. The use of parametric programming for measurement can solve a wide range of measurement automation challenges and reduce the number of inspection plans required for the entire range of parts.

Keywords: rationing process, coordinate control, Industry 4.0, automation of the rationing process.

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

Автоматизированная система в основном означает систему, которая использует технологии для управления различными типами оборудования и машин без необходимости вмешательства людей или ручного выполнения контроля в производстве товаров и услуг. При уменьшении помощи человека автоматизированные системы управления сокращают время производства, повышают гибкость производства, снижают затраты и исключают человеческий фактор.

Целью автоматизированного управления является повышение эффективности и надежности. Это повышает производительность труда рабочих и освобождает людей от контролирующих систем, которые работают в труднодоступных или опасных для здоровья условиях.

Основными элементами автоматизированного управления являются:

- мощность: для выполнения процесса и эксплуатации автоматизированной системы;
- программа инструктажа: руководить процессом;
- система управления: для приведения в действие инструкций.

Автоматизированные системы управления управляют командами и регулируют поведение других устройств или систем с помощью контуров управления для достижения желаемых результатов. Объем такого контроля варьируется от одной системы управления отоплением дома до крупного управления промышленной автоматизацией.

Три функциональных элемента, которые необходимы в автоматизированных системах управления:

- измерение;
- обнаружение ошибок;
- итоговый контроль.

Индустрия 4.0 – это интегрированная система, состоящая из средства автоматизации, роботизированного управления, коммуникаций и аналитики больших данных. Растущее внедрение промышленных роботов является одним из основных движущих факторов этого рынка, в то время как риски данных, связанные с интеграцией передовых технологий, являются сдерживающими факторами.

В результате все виды промышленности переходят к концепции автоматизации «Индустрия 4.0» [1].

Доказано, что это обеспечивает лучшую гибкость, повышенную эффективность и высокое соотношение работы и затрат в ограниченные сроки. Ранее на производствах использовалось ручное управление, что требовало больших затрат времени и средств и в определенной степени было неэффективным.

Но теперь автоматизация устранила все эти недостатки и проблемы. Это привело к экономии ресурсов.

Индустрия 4.0 имеет следующие цели и принципы проектирования:

- взаимосвязанность;

- получение данных в режиме реального времени;
- обмен информацией и прозрачность;
- техническая помощь в процессе принятия решений и децентрализация решений.

Индустрию 4.0 можно понимать как исчерпывающий способ структурированного объединения множества машин, различных видов программного обеспечения, интеллектуальных датчиков, современных контроллеров, исполнительных механизмов для организации, анализа, прогнозирования и использования информации о результатах работы контроллеров в сложных промышленных процессах [2].

Основным преимуществом современных координатно-измерительных машин является возможность полной автоматизации как на этапе реализации координатного метода измерений, так и на этапе обработки результатов этих измерений.

Подсистема анализа и обработки результатов измерений позволяет производить расчет достаточно сложных параметров, но данные параметры могут являться стандартными.

Часто возникает необходимость провести координатный расчет не стандартизованных параметров. Для данной цели существует расчетная программа. Конечной целью обработки информации, полученной координатно-измерительной машиной в системе координат системы измерения – получение отчета (протокола) обработки измеренных координат реальных поверхностей деталей с указанием всех геометрических параметров отклонений формы и расположения всех поверхностей детали [3].

При выполнении измерений в машиностроении часто необходимо измерять детали, различающиеся только типоразмером или другими незначительными признаками в конструкции. При разработке плана контроля на координатно-измерительных машинах каждое такое различие требует создания индивидуального плана контроля.

Применение параметрического программирования для выполнения измерений позволяет решить широкий спектр задач автоматизации измерений и снизить количество необходимых планов контроля для всей номенклатуры деталей.

Один из способов разработки параметризованных планов контроля – начать с обычного не параметризованного плана контроля для какой-либо конкретной детали. В таком плане контроля те значения, которые различны для деталей, задаются как РСМ-параметры. Это позволит применять один план контроля, как для деталей различных типоразмеров, так и для деталей, имеющих различия в кон-

струкции. РСМ является языком программирования, разработанным для взаимодействия оператора с координатно-измерительными машинами. Кроме самой параметризации планов контроля с его помощью можно выполнять и ряд других задач:

- интерактивно спрашивать у оператора данные для их последующего использования во время числового программного управления измерений;
- централизованно определять и изменять одинаковые значения, используемые в различных местах плана контроля;
- снимать ограничения при программировании условий и циклов, задаваемых при использовании только полей ввода в окнах диалогов;
- напрямую управлять перемещениями КИМ;
- организовывать доступ к результатам измерений.

Все эти функции можно применять как отдельно, так и в совокупности [4].

Высокая эффективность разработанных оптимизированных методов координатных измерений геометрических параметров деталей может быть обеспечена при использовании для их реализации средств измерения, также оптимизированных с точки зрения решаемой измерительной задачи. Причем максимального эффекта здесь можно достичь на основе комплексного подхода, заключающегося в том, что рационализация методов измерений и совершенствование средств измерений рассматриваются как две взаимосвязанные задачи, решаемые совместно с целью максимального повышения качества координатных измерений [5].

Литература

1. Automation Control Systems & Process Control for Industry 4.0 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.mdpi.com/journal/processes/special_issues/automation_control_process_control.
2. Real Time Automation and Ratio Control Using PLC & SCADA in Industry 4.0 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/366764826_Real_Time_Automation_and_Ratio_Control_Using_PLC_SCADA_in_Industry_40.
3. Инновации в профессиональном и профессионально-педагогическом образовании. Том II: материалы конференции / под научной редакцией Е.М. Дорожкина, В.А. Федорова. – Екатеринбург : РГППУ, 2020. – Т. 2.
4. Зубарев, Ю.М. Автоматизация координатных измерений в машиностроении : учебное пособие для вузов / Ю.М. Зубарев, С.В. Косаревский. – 4-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2021.
5. Теория, расчет и проектирование оптимизированных методик координатного контроля в машиностроении : монография / В.Л. Соломахо [и др.]. – Минск : БНТУ, 2012.

УДК 666.75

ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ОГНЕУПОРНОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕСТНОГО ГЛИНИСТОГО СЫРЬЯ

Сергиевич О.А.¹, Попов Р.Ю.¹, Богдан Е.О.¹, Дятлова Е.М.¹, Колонтаева Т.В.²

¹Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе установлена возможность использования местного глинистого сырья и выгорающих добавок для получения теплоизоляционных огнеупорных материалов.

Ключевые слова: теплоизоляционный материал, механическая прочность, теплопроводность, спекание.

THERMAL INSULATING CERAMIC MATERIALS FOR FIREPROOF PURPOSE USING LOCAL CLAY RAW MATERIALS

Sergievich O.A.¹, Popov R.Yu.¹, Bogdan E.O.¹, Dyatlova E.M.¹, Kolontaeva T.V.²

¹Educational institution "Belarusian State Technological University"

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The work established the possibility of using local clay raw materials and burnable additives to obtain thermal insulation fireproof materials.

Key words: thermal insulation material, mechanical strength, thermal conductivity, sintering.

Адрес для переписки: Сергиевич О.А., ул. Свердлова, 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь
e-mail: Topochka.83@mail.ru

Теплоизоляционные керамические изделия, от качества которых во многом зависит уровень развития ряда химических и металлургических производств, значительно сокращают потери тепла и холода в окружающую среду и обуславливают устойчивый режим работы технологического оборудования. Такие материалы характеризуются малой способностью проводить тепло вследствие их высокой пористости. По характеру микроструктуры (строение и форма пор) теплоизоляционные материалы могут быть: ячеистыми, зернистыми, волокнистыми, пластинчатыми или смешанными [1]. Ячеистое строение характерно для ячеистых бетонов, пеностекла, пенокерамики, газонаполненных пластмасс и некоторых других материалов. Зернистое строение имеют сыпучие материалы. Для материалов с волокнистым строением характерна очень высокая степень пористости и отсутствие замкнутых пор. Пластинчатое строение имеет вспученный вермикулит, что является его отличительной особенностью по сравнению с другими пористыми материалами. Теплоизоляционные материалы со смешанным строением макроструктуры, как правило, отличаются лучшими физико-техническими свойствами по сравнению с материалами, имеющими однородную структуру (пеноперлитокерамика, армированная тугоплавким волокном и т. д.) [2].

На основании вышесказанного установлена цель данной работы: разработка составов масс с использованием местного глинистого сырья и выгорающих добавок для получения теплоизоляционных огнеупорных изделий с требуемыми эксплуатационными характеристиками.

Для синтеза керамических теплоизоляционных материалов в качестве исходных сырьевых материалов использовались глина тугоплавкая месторождения «Туровское», огнеупорная глина Веселовского месторождения, шамот из лома огнеупорных алюмосиликатных изделий; в качестве выгорающих добавок – торф, лигнин и древесные опилки.

Керамическая масса для получения образцов методом пластического формования готовилась из предварительно высушенных, измельченных и просеянных глинистых материалов (через сито № 05), выгорающих добавок – (№ 1) путем совместного смешения требуемого количества исходных сырьевых компонентов и увлажнения до относительной влажности от 26,0 до 28,0 %. Полученная масса вылеживалась несколько дней для усреднения влажности и тиксотропного упрочнения. Формование опытных образцов полуфабриката в виде кирпичасырца размерами (260×130×70) мм осуществлялось на опытном лабораторном ленточном прессе марки СМК-435. Образцы сушились сначала на воздухе, а затем при температуре 70±5 °С в экспериментальной сушилке типа СНОЛ до остаточной влажности после сушки 2,5–2,8 %. Обжиг образцов проводился в лабораторной камерной электропечи марки SNOL 6,7/1300 при максимальной температуре 1050 °С с выдержкой 1 ч и инерционным охлаждением. После обжига образцы имели удовлетворительный внешний вид без признаков деформации.

Линейная воздушная усадка опытных образцов составляет 7,6–10,2 %. Воздушная усадка образцов с выгорающими добавками выше и обусловлена их гигроскопичностью и различной способностью впитывать воду. Огневая усадка образцов без вы-

горающих добавок составляет 1 %, с торфом и древесными опилками – 1,5 %, с лигнином – около 2 %. Огневая усадка обусловлена разным объемным содержанием выгорающих компонентов. Лигнин более легкий по массе, поэтому он занимает больший объем, и при обжиге его потери при прокаливании выше, чем у торфа. Усадка образцов без выгорающих добавок меньше остальных, так как усадка идет только за счет потери химически связанной влаги, воды пор, разложения органических примесей и процессов спекания.

Кажущаяся плотность опытных экспериментальных образцов изменяется в пределах 1100–1300 кг/м³. Средние значения открытой пористости имеют значения от 40 до 56 %, что объясняется малой контактной поверхностью частиц. Перенос вещества при спекании происходит за счет вязкого течения расплава и диффузионных процессов, однако образование большого количества жидкой фазы нежелательно, т. к. происходит заполнение пор и снижаются теплоизоляционные свойства синтезированных материалов.

С увеличением содержания выгорающих добавок теплопроводность образцов снижается, что объясняется значительным повышением их пористости. Установлено, что коэффициент теплопроводности при температуре измерения 350 °С для исследуемых образцов изменяется в пределах от 0,42 до 0,54 Вт/(м·К).

Значения показателей механической прочности при сжатии образцов теплоизоляционных материалов составляют от 5,7 до 7,5 МПа при содержании выгорающих добавок до 40 %. Прочность образцов с лигнином и торфом по сравнению с древесными опилками возрастает незначительно, что обусловлено малой поверхностью контакта керамических частиц и сохранением высокой пористости образцов. Зольный остаток заполняет поры и материал становится более плотным.

Методом рентгенофазового анализа была установлена зависимость фазового состава синтезированных образцов от температуры обжига и вида выгорающих добавок (зольного остатка). Для образцов из массы, не содержащей выгорающих добавок, характерно присутствие муллита, кварца и ильменита. В образцах с использованием торфа и лигнина образуются фазы шпинели $MgO \cdot Al_2O_3$ и анортита $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$. В образцах с древесными опилками присутствуют следующие фазы: шпинель, анортит и α -кварц.

Оптическая микроскопия позволяет охарактеризовать микроструктуру материала, соотношение кристаллической и стекловидной фаз и характер их распределения. На рисунке 1 представлены оптические снимки синтезированных образцов с 20 % торфа, древесных опилок и лигнина, синтезированные при 1050 °С.

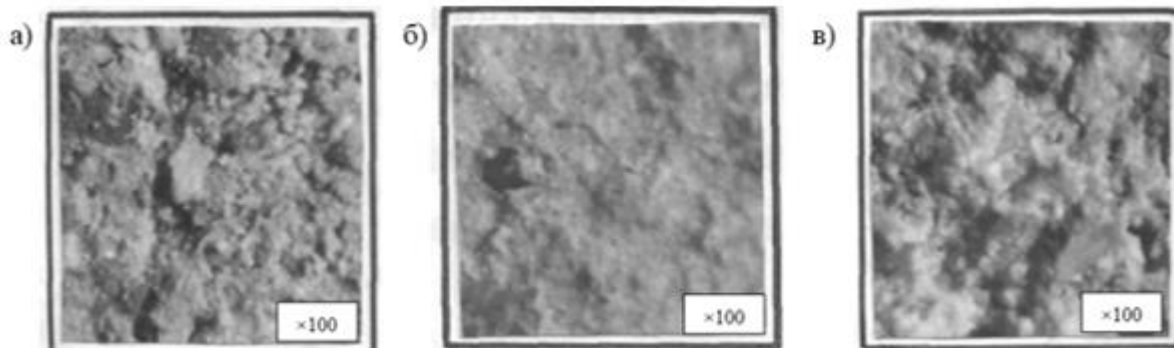


Рисунок 1 – Оптические снимки синтезированных образцов с выгорающими добавками: а – 20 % торфа; б – 20 % лигнина; в – 20 % древесных опилок

Образцы с добавкой торфа имеют ярко-рыжий цвет с мелкими включениями железа и кварца в виде белых матовых кристаллов. Образцы мелкопористые, имеются нити расплава. Для образцов с добавкой лигнина и опилок наблюдается высокопористая структура, отдельные зерна кристаллов хорошо просматриваются.

Следует отметить, что по своим физико-механическим показателям синтезированные огнеупорные керамические материалы не уступают

импортным аналогам, что позволяет рекомендовать их в качестве теплоизоляционных материалов тепловых агрегатов и устройств общего назначения.

Литература

1. Забрускова, Н.Т. Теплоизоляционная керамика / Н.Т. Забрускова, Ю.Н. Кочан // Стекло и керамика. – 1982. – № 8. – С. 26–27.
2. Гузман, И.Я. Высокоогнеупорная пористая керамика / И.Я. Гузман. – М. : Металлургия, 1971. – 208 с.

УДК 666.3/7

КЕРАМИЧЕСКИЕ ТЕРМОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ И ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Сергиевич О.А.¹, Попов Р.Ю.¹, Колонтаева Т.В.², Дятлова Е.М.¹, Шевченко А.А.³

¹Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»

²Белорусский национальный технический университет

³Белорусский государственный аграрный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработаны составы и технологические параметры синтеза керамических термостойких материалов для термообработки изделий и деталей электронной техники.

Ключевые слова: термостойкий материал, модифицирующие добавки, кристаллические фазы, ТКЛР.

CERAMIC HEAT RESISTANT MATERIALS FOR HEAT TREATMENT OF PRODUCTS AND PARTS ELECTRONIC ENGINEERING

Sergievich O.A.¹, Popov R.Yu.¹, Kolontaeva T.V.², Dyatlova E.M.¹, Shevchenok A.A.³

¹Educational institution "Belarusian State Technological University"

²Belarusian National Technical University

³Belarusian State Agrarian Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Compositions and technological parameters for the synthesis of ceramic heat resistant materials for heat treatment of products and electronic components have been developed.

Key words: heat resistant material, modifying additives, crystalline phases, thermal expansion coefficient.

Адрес для переписки: Сергиевич О.А., ул. Свердлова, 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь

e-mail: Topochka.83@mail.ru

В производстве электронной техники нередко присутствуют высокотемпературные процессы, связанные с синтезом исходных материалов, а также с термообработкой различных деталей и изделий. Для этих целей используются теплотехнические установки и вспомогательный огнеприпас, которые работают, как правило, в периодическом режиме. Футеровка установок и огнеприпас в основном изготавливаются из керамических огнеупоров. Их срок службы зависит от периодичности и количества термоциклов резкого нагрева и охлаждения изделий, а также от термостойкости огнеупора. В основе явлений, вызывающих разрушение изделий, лежат процессы, связанные с возникновением в материале напряжений.

Различают два вида напряжений: первые обусловлены градиентом температур, а вторые связаны с анизотропией ТКЛР, протекающими химическими реакциями при эксплуатации изделий и полиморфными превращениями. Термостойкость – сложное свойство, зависящее от ряда различных факторов, огромное влияние на которое имеет ТКЛР, механическая прочность, структурные характеристики синтезированных фаз, форма и габариты изготавливаемых изделий. Создание материалов, характеризующихся оптимальной термоустойчивостью, является достаточно сложной задачей, при этом высокая термостойкость материала не всегда означает высокую термостойкость изделия. Оценить термостойкость ма-

териалов можно критериально. Безусловно, рассчитать все 22 критерия для разрабатываемого материала невозможно, т. к. для этого необходимо определить около 100 различных характеристик.

Как показал анализ критериев термостойкости, для того, чтобы повысить устойчивость материалов к циклическим термическим нагрузкам целесообразно увеличить механическую прочность и теплопроводность материала, снизить температурный коэффициент линейного расширения, создать структуру, способную релаксировать термические напряжения.

Основной целью данного исследования является разработка составов и технологических параметров синтеза керамических масс для получения термостойких материалов на основе сочетания различных кристаллических фаз для термообработки изделий и деталей электронной техники.

В таблице 1 приведены наиболее известные высокопрочные и малорасширяющиеся кристаллические фазы, а также их основные физико-механические и термические характеристики.

Для получения керамических термостойких материалов на основании литературных данных наибольший интерес представляют системы $Al_2O_3-SiO_2$, $Al_2O_3-TiO_2$, $MgO-Al_2O_3-SiO_2$, $Li_2O-Al_2O_3-SiO_2$ с применением различных модифицирующих добавок, способствующих изменению структурно-фазового состава в нужном направлении и улучшающих прочностные, термические и

огнеупорные свойства. К добавкам 1-го рода относятся корунд, карборунд, соединения циркония, оксидная и бескислородная керамика, обу-

славливающие получение композиционных материалов с улучшенными термомеханическими свойствами.

Таблица 1. Кристаллические фазы и их основные свойства

Наименование кристаллической фазы (формула)	Сингония	Свойства		
		Температура плавления, °С	Механическая прочность при сжатии, МПа	ТКЛР, $\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Корунд (α -, β -, γ - Al_2O_3)	Тригональная кубическая	2050	3000	8,0–8,5
Муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)	Ромбическая	1910	1500–2000	2,11–7,1
Бадделейт (ZrO_2)	Моноклинная тетрагональная кубическая	2700	2100	5,0–6,0
Шпинель ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)	Кубическая	2123	1100–1200	8,0
Цельзиан ($\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$)	Моноклинная	1740	600–700	2,7
Кордиерит ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$)	Ромбическая псевдогексагональная	1470	200	1,4
Титанат алюминия ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$)	Ромбическая	1800	1000	1,9

Добавками 2-го рода, оказывающими значительное влияние на процесс спекания и формирования структуры материала, являются борсодержащие компоненты (H_3BO_3), датолитовый концентрат (Na_2SiF_6), криолит (AlF_3), ортофосфорная кислота (H_3PO_4), которые вводились в состав масс на основе систем Al_2O_3 – SiO_2 , MgO – Al_2O_3 – SiO_2 от 0,5 до 10 мас. %. Установлено, что добавка борсодержащих компонентов оказывает флюсоующее действие и может снизить температуру обжига огнеупоров с 1350 до 1280–1300 °С. При оптимальном введении их в количестве 0,5–1 % наблюдается повышение механической прочности и снижение ТКЛР синтезированных образцов. Фторсодержащие добавки могут выступать в качестве инициаторов кристаллизации образующегося при спекании расплава с изменением структуры огнеупора и увеличением его прочности от 58 до 82 МПа при оптимальном количестве добавки 0,5–1,5 %. Фосфатные добавки значительно повышают механическую прочность сырца, но при этом увеличивается ТКЛР, что сказывается и на термостойких характеристиках синтезированных материалов.

Положительное влияние на термостойкость оказывают мелкие герметично закрытые сферические поры, равномерно распределенные по всему объему, для образования которых рекомендуется вводить в количестве 3–5 % в мелкодисперсную кордиеритовую фракцию гидрофобные органические добавки: битум, мазут, парафин. Поверхностно-активные вещества (кремнийорганические жидкости, кубовые остатки высших жирных спиртов и кислот) снижают упругое расширение прессуемых образцов, уменьшая количество щелевидных пор. ПАВы в количестве 0,2–0,3 %, адсорбируясь на поверхности частиц каолинита, повышают дефектность его структуры, уменьшая теплоту смачивания и гидрофильность, и уже при 870 °С начинает синтезироваться кристаллическая фаза муллита.

В качестве примера ниже приводятся результаты синтеза высокотермостойких керамических материалов на основе системы MgO – Al_2O_3 – SiO_2 с использованием фторсодержащих добавок.

Исходными сырьевыми компонентами являлись огнеупорная глина Веселовского месторождения, каолин Просяновского месторождения, технический глинозем, тальк Онотский и шамот высокоглиноземистый молотый полифракционный с размером частиц от 3 до 0,1 мм.

В качестве модифицирующих добавок использованы Na_2SiF_6 и AlF_3 , которые вводились в состав исходной массы в количестве 1,0 и 0,5 % сверх 100 % в виде химических реактивов (марки «ХЧ»). Образцы изготавливались по традиционной технологии пластического формования с относительной влажностью формовочной массы 18–20 % и обжигались при температурах 1300 и 1350 °С с выдержкой при максимальной 1 ч.

Основные свойства синтезированных опытных образцов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Физико-механические и термические свойства

Наименование показателей	Модифицирующая добавка	
	Na_2SiF_6	AlF_3
Общая усадка, %	6,36	7,73
Водопоглощение, %	7,16	8,64
Открытая пористость, %	14,04	15,57
Кажущаяся плотность, кг/м^3	1960	1920
ТКЛР, 10^{-6} K^{-1}	3,01	4,07
Механическая прочность при сжатии, МПа	43,08	34,9
Термостойкость (количество теплосмен 1000 °С – вода)	Свыше 60	Свыше 60
Огнеупорность, °С	1630	1690
Температура эксплуатации, °С	1250–1300	1350–1400

Установлено, что использованные модифицирующие добавки наиболее эффективно ускоряют процесс спекания керамики за счет регулирования структуры и увеличения количества стеклофазы, не изменяя качественный фазовый состав

синтезированных материалов, который представлен кордиеритом и муллитом.

Разработанные термостойкие керамические материалы в качестве огнеприпаса могут быть использованы для термообработки изделий и деталей электронной техники.

УДК 006.9:004.415.2(047)(476)

**ИСПЫТАНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ К МЕХАНИЧЕСКОМУ ИЗНОСУ ПРИ
СЕРТИФИКАЦИИ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ ДОРОГИ
МЕХАНИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Сернов С.П.¹, Балохонов Д.В.¹, Колонтаева Т.В.¹, Тадэуш Н.Н.¹, Коничева Л.М.²

¹*Белорусский национальный технический университет*

Минск, Республика Беларусь,

²*ОАО «РУДЕНСК»*

Руденск, Республика Беларусь,

Аннотация. В настоящее время при испытаниях устройств освещения дороги на стойкость к механическому износу для сертификации на соответствие Правилам ООН № 149 существует ряд противоречий, обусловленных как неточностями формулировки методики испытания в Правилах ООН, так и отсутствием четкого понимания механизма гидроабразивного износа при эксплуатации этих устройств. Для ликвидации указанных проблем предлагаются рекомендации, основной из которых является проведение испытаний в течение фиксированного времени не менее 30 минут.

Ключевые слова: устройства и системы освещения дороги, сертификация, испытания на износ.

**MECHANICAL VEHICLES ROAD ILLUMINATION DEVICES AND SYSTEMS MECHANICAL
DETERIORATION CERTIFICATION TESTS**

Sernov S.P.¹, Balokhonov D.V.¹, Kolontayeva T.V.¹, Tadeush N.N.¹, Konicheva L.M.²

¹*Belarusian national technical university*

Minsk, Republic of Belarus

²*JSC "Rudensk"*

Rudensk, Republic of Belarus

Abstract. Presently there are several contradiction in UN Regulations № 149 concerning road illumination devices mechanical deterioration tests, these ranging from inconsistent formulation of test method to outright lack of understanding what mechanism causes hydro abrasive wear of said devices exterior. To deal with these problems, a set of recommendations is proposed, main of them being to limit said tests to a fixed time no less than 30 minutes.

Key words: automotive lighting devices, certification, wear tests.

*Адрес для переписки: Д.В. Балохонов, пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: balokhonov@bntu.by*

В рамках Нового Глобального подхода по гармонизации ТНПА, рабочей группой по вопросам освещения и световой сигнализации (WP29) были приняты новые Правила ООН №№ 148–150, дополненные по номенклатуре светотехнического оборудования транспортных средств и объединенные по методам их испытаний. В большей степени новации коснулись устройств и систем освещения дороги, их классификации по источникам света и световому распределению фар и адаптивных систем, изложенных в Правилах ООН № 149.

Поскольку рассеиватели на основе пластмасс практически вытеснили стеклянные в конструкциях фар, актуальной задачей является обеспечение их оптических характеристик при эксплуатации. В соответствии с приложением 8 Правил

ООН № 149, ими являются коэффициент пропускания и коэффициент рассеивания света рассеивателя фар. Эти характеристики зависят от состояния поверхности рассеивателя, и ухудшаются в процессе эксплуатации от воздействия дорожной пыли, грязи, осадков и ультрафиолетового излучения: изделия, отработавшие достаточный срок, имеют помутневший рассеиватель, и поэтому они не могут хорошо выполнять ни сигнальную, ни осветительную функцию, а в случае фар за счет чрезмерного рассеяния света встречные водители могут быть ослеплены.

Механизм помутнения полимерных рассеивателей фар в настоящее время специально не исследовался, и предполагается, что помутнение вызвано в основном воздействием абразивных ча-

стиц в жидкости, которые при движении попадают на фару практически нормально к поверхности, вызывая т. н. усталостный износ (вырыв частиц материала с поверхности изделия при возникновении контактной усталости), так как поверхность полимера с покрытием недостаточно твердая и упругая, чтобы наблюдалось абразивное (царапающее) изнашивание. Износ может усиливаться при воздействии углеводородов и дорожных химикатов, что изменяет свойства поверхности и облегчает вырыв частиц материала.

Особенно актуальна проблема помутнения рассеивателей для светодиодных фар: срок службы светодиодов вполне может оказаться больше срока, за который помутнеет рассеиватель фары, а из-за невозможности замены светодиодов (сложность согласования оптических осей и другие проблемы при снятии/постановке светодиодных матриц, а также нарушение герметичности фар) работоспособная фара с полной рыночной стоимостью 2000–5000 \$ может не отработать даже гарантированный срок службы.

Проблема помутнения рассеивателей фар является настолько актуальной, что это привело к появлению т. наз. «мастерских по осветлению фар» как на территории Республики Беларусь, так и в других странах мира независимо от их уровня развития (США, страны Европейского Союза, страны Ближнего Востока и др.). Большинство этих мастерских является кустарными, и соответствие фар ТНПА после восстановления не проверяется.

Поэтому при сертификации светотехнических изделий на соответствие Правилам ООН необходимо проводить в том числе измерения коэффициентов рассеяния и пропускания светотехнических изделий до и после воздействий, имитирующих пыль, загрязнение и прочие факторы, возникающие при дорожном движении.

Однако при испытаниях фар на соответствие новым Правилам ООН № 149 возникает ряд проблем, обусловленных неточностями формулировок и процедур сертификации, которые не соответствуют текущему положению дел. Одной из таких проблем являются испытания на сопротивление механическому износу (англ. *resistance to mechanical deterioration*).

В соответствии с Правилами ООН № 149 (и им предшествующими Правилами ООН № 112), предлагается проводить эти испытания путем равномерного распыления на рассеиватель фары водно-песчаной смеси строго заданного состава в строго определенных условиях, и контролировать 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.

Однако время распыления водно-песчаной смеси не задано в ТНПА четко и однозначно: «Наружная поверхность рассеивателей фары подвергается один или несколько раз воздействию струи песка». Также имеется требование измерять изменение коэффициента рассеяния после каждого испытания, что вкупе с неопределенностью времени воздействия может привести к тому, что сертификат соответствия будет выдан негодному изделию (недостаточное время испытания) или не выдан годному изделию (слишком большое время испытания).

С целью устранить данную неточность были проанализированы ТНПА по испытанию полимерных изделий с покрытиями или без них на износ (например, ГОСТ 11012, ISO 4649, ISO 9352, DIN 52108, EN 295-3), однако методы, описанные в них, работают с использованием связанного абразива, который вызывает не усталостный, а абразивный износ поверхности, что не может считаться достоверным моделированием износа рассеивателей фар. Практически во всех ТНПА этого типа степень износа определяется по уменьшению массы испытательного образца, что не является критичным для светотехнических изделий, однако однозначно задается время испытания и указывается состав абразива.

Специальных ТНПА, касающихся испытаний на гидроабразивный износ полимеров с покрытиями или без них, не было обнаружено. Кроме того, не было обнаружено ТНПА по испытаниям на гидроабразивный износ в смежных областях, что является основанием для разработки таких ТНПА.

Следует отметить, что существуют работы (не ТНПА) в смежных областях промышленности (нефтехимия), в которых обосновывается недопустимость использования испытаний на абразивный износ в случае с полимерными покрытиями в контакте с жидкостями. Приводимая в данных работах методика испытаний вполне согласуется с методикой из Правил ООН № 149 (струя водно-песчаной суспензии практически такого же состава с частицами такого же размера, распыляемая из форсунки практически в таких же условиях), за исключением указания точного времени испытания – 0,5 часа.

Таким образом, из приведенного анализа вытекают следующие выводы и рекомендации:

1. Процедура испытания по Правилам ООН № 149 вполне соответствует механизму гидроабразивного износа рассеивателя в реальных дорожных условиях (попадание песка, камней и пыли в водяных струях или каплях практически нормально к поверхности рассеивателя). Рекомендуется дополнить Правила четким указанием времени испытания, что существенно снизит вероятность ошибок сертификации первого и второго рода.

2. Время испытания должно быть строго фиксировано, и должно составлять порядка 30 мин при имеющемся в Правилах ООН № 149 составе и скорости суспензии. Это позволит проверить и покрытие, и полимер под ним на усталостный износ.

3. Годность фары (рассеивателя) следует определять по коэффициенту пропускания и рассеяния света, а точнее, по их изменению до и после испытания. Контролировать изменение этих

показателей в ходе испытания не рекомендуется, так как это увеличивает время работы и повышает вероятность совершения дополнительных ошибок (например, остатки суспензии надо убирать с рассеивателя с помощью ветоши, и абразивный износ при десятом-двадцатом повторении такого действия вполне может превысить усталостный износ от потока суспензии).

УДК 006.90.03.03

АНАЛИЗ НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ РАССТОЯНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОРОЖНЫХ КУРВИМЕТРОВ

Соколовский С.С., Алешевич Д.Д.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Проведен системный анализ методов и средств метрологической оценки дорожных курвиметров.

Ключевые слова: дорожные курвиметры, метрологическая оценка, методы и средства.

ANALYSIS OF REGULATORY AND METHODOLOGICAL SUPPORT FOR METROLOGICAL TRACEABILITY OF DISTANCE MEASUREMENTS USING ROAD CURVIMETERS

Sokolovsky S.S., Aleshevich D.D.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. A systematic analysis of methods and means of metrological assessment of road curvimeters was carried out.

Key words: road curvimeters, metrological assessment, methods and means.

*Адрес для переписки: Соколовский С.С., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: s.s.sokolovsky@gmail.com*

Дорожные курвиметры относятся к группе измерительных приборов, предназначенных для измерения расстояния между точками или пунктами на местности при перемещении по криволинейной траектории. Необходимость выполнения таких измерений может возникать, например, при нормировании дорожных дорог, расследование дорожных происшествий, в ходе которых требуется получать достоверную оценку тормозного пути автомобиля, перемещающегося при торможении на высокой скорости, как правило, с заносом, то есть не по прямой, а по криволинейной траектории.

Дорожный курвиметр на практике иногда называют «колесо измерительное», «дорожное колесо», «мерное колесо» и основу его конструкции в любом случае составляет специальное тарированное колесо, соединенное с механическим или электронным счетчиком пройденного расстояния.

Все это позволяет утверждать, что измерения отмеченного выше вида относятся к сфере законода-

тельной метрологии и для них очень важное значение имеет обеспечения необходимой метрологической прослеживаемости результатов измерений.

Следует констатировать, что для рассматриваемого вида средств измерений, а именно, курвиметров дорожных, отсутствует нормативная документация международного, регионального и национального уровня, регламентирующая их метрологические характеристики, а также методы и средства их поверки. Имеются только технический паспорта и эксплуатационная документация на разные виды дорожные курвиметры от разных производителей.

Исходя из этого следует, что существуют определенные проблемы в плане построения схемы метрологической прослеживаемости для курвиметров дорожных, тем более что кроме всего прочего отсутствует национальный эталон, на требуемый диапазон измерения. В связи с этим было предложено решать проблему с обеспечением метрологической прослеживаемости результатов измерений,

выполняемых на базе рассматриваемых средств измерений, с привязкой к государственному эталону единицы длины № ГЭТ 2-2010, находящемуся в России. Разработанная с учетом этого обстоятельства схема метрологической прослеживаемости представлена на рисунке 1.

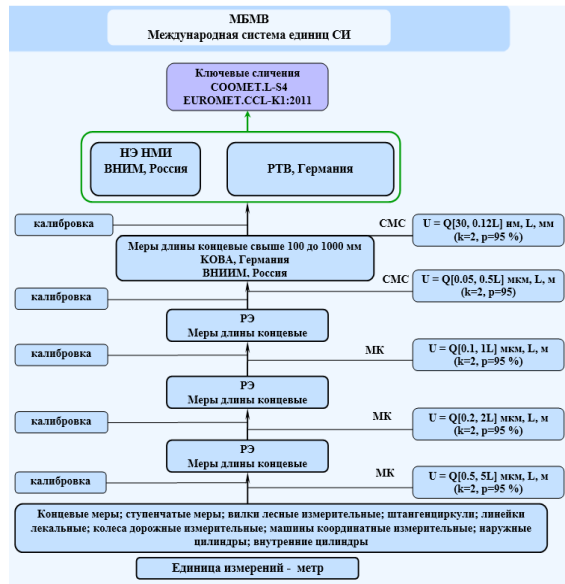


Рисунок 1 – Схема метрологической прослеживаемости результатов измерений, выполняемых на базе дорожных курвиметров

При этом могут быть предложены два метода оценивания метрологических характеристик курвиметров дорожных, а именно: метод прямого измерения расстояния между некоторым образом зафиксированными реперными точкам и автоматический метод с использованием установки УМКАЭ-01, который основан на программно-аппаратном комплексе управления и обработки информации в автоматическом режиме. При использовании по назначению такая установка может осуществлять автоматическое вращение калибруемого измерительного колеса по часовой стрелке и против часовой стрелки в диапазоне от 0° до 360° .

Метод прямого измерения реализуется следующим образом:

1. При помощи рулетки лазерной на ровной поверхности отмеряют расстояния 0–1; 0–10; 0–20; 0–50 м и отмечают их линиями. Толщина нанесенных линий должна быть не более 1,5 мм.

2. Отклонения показаний колеса определяют на интервалах 0–1, 0–10, 0–20, 0–50, 0–100, 0–500, 0–1000, 0–5000, 0–9000 м. Колесо устанавливают на нулевую отметку так, чтобы указатель располагался над отметкой ноль, счетчик колеса обнуляют.

3. Перемещают колесо до нанесенных отметок (1; 10; 20; 50 м) и снимают показания по счетчику. Измерения на длине 100; 500; 1000; 5000 и 9000 м проводят повторно-шаговым методом.

Данный метод является типовым, но имеет ряд существенных недостатков. Во-первых, необходимо оператору предоставить помещение определенного метража, что иногда бывает невозможно на предприятиях, где осуществляют определение метрологических характеристик курвиметров дорожных. Во-вторых, при реализации метода необходимо учитывать поправки на неровность поверхности, по которой прокатывают колесо. Кроме этого, оператор должен обладать определенной квалификацией и опытом, так как на результат определения метрологических характеристик в большой степени влияет человеческий фактор, такие особенности как невнимательность, неравномерное движение, нарушение линии следования и т. д.

Определение метрологических характеристик дорожных курвиметров с помощью автоматического метода с использованием установки УМКАЭ-01 осуществляется по следующему алгоритму:

1. Отклонение показаний колеса определяют в точках 1; 10; 20; 50; 100; 500; 1000; 5000; 9000 м при вращении колеса по часовой стрелке и против часовой стрелки.

2. Колесо устанавливают на установке и обнуляют счетчик колеса.

3. При помощи соответствующих команд в программном обеспечении установки задают перемещения колеса, соответствующие выделенным точкам и снимают показания по счетчику колеса.

4. Количество наблюдений при вращении колеса по часовой и против часовой стрелки $n \geq 5$.

Данный метод современный и открыт для усовершенствования и доработок в будущем. Удобен в использовании и не требует больших нагрузок на оператора в плане его трудоемкости. Программно-аппаратный комплекс управления позволяет быстро обработать информацию и выдать метрологические характеристики в электронном виде в форме таблицы, что удобно для проведения дальнейшего анализа. Также такой подход позволяет выполнять измерения с меньшими затратами по времени. Кроме того, сводится к минимуму влияние человеческого фактора, так как все основные операции автоматизированы. Установка достаточно компактная и не требует помещения большого метража для реализации метода. Также система позволяет устанавливать и поддерживать заданную угловую скорость измерительного колеса (моделировать постоянную линейную скорость поверхности).

Литература

1. Закон Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений» (в редакции от 11.11.2019 № 254–З) 27.11.2020.

2. Об утверждении Правил осуществления метрологической оценки в виде работ по калибровке средств измерений: Постановление государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь от 23 апреля 2021 г. № 42.

УДК 682.62.018.012

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ОПЕРИРОВАНИЯ БАЗОЙ ДАННЫХ В РАМКАХ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕТОДИК ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ

Соколовский С.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Определены принципы классификации и кодирования измерительных задач, а также методик выполнения измерений, составляющие основу базы данных для автоматизированного проектирования методик выполнения измерений геометрических параметров деталей.

Ключевые слова: геометрические параметры, методики выполнения измерений, автоматизация проектирования, база данных.

PRINCIPLES OF CREATION AND OPERATION OF THE DATABASE WITHIN THE FRAMEWORK OF THE COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEM OF METHODS FOR MEASURING GEOMETRIC PARAMETERS OF PARTS

Sokolovsky S.S.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The principles of classification and coding of measurement tasks, as well as measurement techniques, which form the basis of a database for automated design of techniques for measuring the geometric parameters of parts, have been determined.

Key words: geometric parameters, measurement techniques, design automation, database.

*Адрес для переписки: Соколовский С.С., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: s.s.sokolovsky@gmail.com*

По мере продвижения на практике новой концепции промышленного производства «Индустрия 4.0» все более широкое распространение получают кастомизированные производственные системы, особенностью которых является использование «гибких» технологий, базирующихся на современных достижениях в сфере компьютерной техники. Все это в полной мере относится и к технологиям метрологического обеспечения производства, одним из аспектов которого является проектирование методик выполнения измерений, выполняемых с целью измерительного контроля параметров различных объектов. Причем, в условиях кастомизированного производства эти объекты постоянно меняются, а следовательно, постоянно изменяется и номенклатура измерительных задач, подлежащих оперативному решению в условиях конкретного производства.

В этом отношении весьма эффективным представляется использование систем автоматизированного проектирования методик выполнения измерений (САПР МВИ), ориентированных на конкретные производственные условия. Учитывая то, что в условиях машиностроительного производства подавляющее большинство измерительных задач связано с контролем геометрических параметров деталей, то в этой сфере наибольший интерес представляют подобные системы, ориентированные на такой вид контроля. Очевидно, что эффективность функционирования таких систем в очень

большой степени определяется организацией и используемым алгоритмом оперирования базой данных. Если говорить о САПР МВИ геометрических параметров деталей, то ее работа должна основываться на базе данных, состоящей из двух информационных модулей, а именно: а) модуля типовых измерительных задач с принятой для них системой кодирования; б) модуля типовых методик выполнения измерений также закодированных соответствующим образом. При этом программное обеспечение функционирования такой системы должно обеспечивать согласованное использование этих модулей для наиболее эффективного решения поставленной задачи проектирования. С учетом вышеизложенного предлагается следующий общий порядок организации и оперирования рассматриваемой базой данных.

В основу разработки первого информационного модуля была положена целевая установка, что он должен обеспечивать идентификацию контролируемого параметра объекта. Поэтому этот модуль, по сути, представляет собой определенную систему классификации и кодирования геометрических параметров деталей, необходимость измерительного контроля может возникать на практике и при его разработке были использованы следующие теоретические посыпки.

Все многообразие геометрических параметров деталей на первом уровне их классификации можно представить в виде таких укрупненных

классификационных элементов как: *группа* → 1; *класс* → 2; *вид* → 3.

Каждый такой классификационный элемент подлежит дальнейшему дроблению на менее обобщенные элементы. При этом можно выделить следующие группы контролируемых геометрических параметров детали и присвоенные им персональные цифровые коды: *размеры* → 1; *параметры макрогеометрии* → 2; *параметры мезогеометрии* → 3; *параметры микрогеометрии* → 4.

В свою очередь каждая группа геометрических параметров деталей делится на классы:

Размеры: *линейные* → 1; *угловые* → 2.

Параметры макрогеометрии: *отклонения формы* → 1; *отклонения расположения* → 2; *суммарные отклонения формы и расположения* → 3.

Следует отметить, что дальнейшее дробление каждого из классов подразумевает выделение видов контролируемых геометрических параметров деталей. Очевидными видами линейных размеров являются: *размеры охватываемых элементов деталей* → 1; *размеры охватываемых элементов деталей* → 2; *размеры всех прочих элементов, которые не могут быть отнесены ни к охватываемым, ни к охватываемым* → 3. Что касается угловых размеров, то их деление на виды может быть осуществлено в зависимости от элементов, определяющих угол. Используя такой критерий, можно выделить следующие виды угловых размеров деталей: *размеры между номинально плоскими поверхностями деталей (плоскостями)* → 1; *размеры между прямыми (осями) и плоскостями* → 2; *размеры между прямыми (осями)* → 3. Для параметров макрогеометрии дробление на виды основывается на использовании информации, представленной в ГОСТ 24642.

В рассматриваемом информационном модуле базы данных помимо рассмотренных выше классификационных элементов «группа», «класс», «вид» добавлены также такие классификационные элементы, как «разновидность» и «тип» контролируемого геометрического параметра детали, которые позволяют дифференцировать такие параметры в зависимости от определенных конструктивных особенностей элементов деталей, являющихся «носителями» тех или иных параметров. Так, например, линейные размеры охватываемых элементов деталей можно рассматривать как в отношении номинально цилиндрических поверхностей деталей (как диаметры этих поверхностей), так и в отношении номинально призматических элементов деталей (как размеры между номинально плоскими поверхностями деталей, определяющими толщину или ширину таких элементов. Отклонение от круглости может рассматриваться как отклонение формы профиля поперечного сечения как номинально цилиндрической, так и номинально конической поверхности детали. Отклонение от прямолинейности может определяться для

профиля нормального сечения номинально плоской поверхности, для образующей номинально цилиндрической поверхности, для ее оси и пр.

Рассмотренные выше дополнительные классификационные элементы необходимы для формирования окончательного кода измерительной задачи и кодируются следующим образом: *разновидность* → *A, B, B, ...*; *тип* → *a, б, в, ...*

Таким образом, присвоение окончательного кода измерительной задачи, являющегося входной информацией для работы со вторым информационным модулем базы данных, т. е. модулем типовых методик выполнения измерений, можно представить, например, в виде таблицы 1.

Таблица 1. Примеры кодирования измерительных задач

Код измерительной задачи	Расшифровка кода измерительной задачи
1-1-1-A-a	Измерение охватываемого линейного размера, ограниченного номинально плоскими элементами гладкого бесступенчатого вала, либо призматической детали: 1 – размеры; 1 – линейные; 1 – охватываемые; A – размер, ограниченный номинально плоскими элементами; a – размер реализован на гладком бесступенчатом валу, либо призматической детали
1-2-2-B-0	Измерение углового размера между осью вала и номинально плоской поверхностью: 1 – размеры; 2 – угловые; 2 – элементы, определяющие угол-ось (прямая) и плоскость; B – угол, ограниченный осью вала и номинально плоской поверхностью; 0 – отсутствует тип

Кодировка в рамках информационного модуля типовых методик выполнения измерений составлена таким образом, что код методики координатного контроля геометрического параметра детали включает в себя код решаемой измерительной задачи, который, в свою очередь, сформирован из кода группы, класса, вида, типа контролируемого параметра. Такая матричная структура кода МВИ позволяет четко идентифицировать те параметры, контроль которых можно осуществить с использованием данной МВИ, и, наоборот, по коду измерительной задачи, заранее сформированному с учетом параметра контроля, можно в рамках данной системы подобрать набор конкурирующих МВИ для решения поставленной задачи.

УДК 53.089.62

МЕСТО КАЛИБРОВКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ ЗАКОНОДАТЕЛЬНОЙ МЕТРОЛОГИИ

Соломахо В.Л.¹, Цитович Б.В.²

¹ Белорусский национальный технический университет

² Белорусский государственный институт повышения квалификации по стандартизации метрологии и управлению качеством

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Сравнительный анализ нормирования поверки и калибровки средств измерений документами законодательной метрологии показывает возможность разработки унифицированных методик поверки однотипных СИ в противоположность разработке методик их калибровки. Предложены рекомендации, позволяющие унифицировать методики калибровки СИ для некоторых типовых задач калибровки.

Ключевые слова: калибровка, методика калибровки, типовые задачи.

CALIBRATION METHODS IN MODERN LEGISLATIVE METROLOGY

Solomakho V.L.¹, Tsitovich B.V.²

¹Belarusian National Technical University

²Belarusian State Institute for Advanced Training in Standardization, Metrology, and Quality Management

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A comparative analysis of the calibration and verification standardization in legislative metrology documents reveals the potential for developing unified calibration methods for similar measuring instruments, in contrast to the development of their calibration procedures. Recommendations are proposed to standardize calibration methods for specific calibration tasks.

Key words: calibration, calibration methodology, standard calibration tasks.

Адрес для переписки: Соломахо В.Л., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: vsolo@bntu.by

В Закон РБ об обеспечении единства измерений включено положение об обязательном прохождении поверки всеми СИ, применяемыми в сфере законодательной метрологии. Что же касается СИ, используемых вне сферы законодательной метрологии, то они могут поверяться или калиброваться. Методики калибровки зависят от перечня метрологических характеристик, формируемых заказчиком, которые определяются в ходе проведения процедуры. Такой подход делает практически невозможным стандартизацию методик калибровки. Прямое влияние калибровки на обеспечение единства измерений отсутствует, однако следует признать, что грамотно организованная процедура может быть метрологически полезной.

Идею «согласованности» метрологических характеристик калибруемого СИ с национальным и/или международным эталоном попытались отразить в определении «метрологической прослеживаемости».

«Метрологическая прослеживаемость – свойство результата измерения, в соответствии с которым результат может быть соотнесен с основой для сравнения через документированную непрерывную цепь калибровок, каждая из которых вносит вклад в неопределенность измерений» (РМГ 29).

Для проведения как поверки так и калибровки необходимо использовать СИ, выстроенные в

определенной иерархической последовательности. Сопоставим определения иерархий СИ из РМГ 29.

«Калибровочная иерархия – последовательность калибровок, начиная от основы для сравнения и кончая средством измерения, причем в этой последовательности результат каждой калибровки зависит от результата предыдущей калибровки».

«Поверочная схема – иерархическая структура, устанавливающая соподчинение эталонов, участвующих в передаче единицы или шкалы измерений от исходного эталона средствам измерений (с указанием методов и погрешностей при передаче), утверждаемая в установленном порядке в виде нормативного документа».

Необходимая и достаточная информативность поверочной схемы обеспечена указанием в ней конкретных требований к точности передачи единицы (шкалы) вниз от эталонов с однозначно установленной точностью воспроизведения единицы (шкалы).

Калибровочная иерархия содержит только идею передачи единицы (шкалы) сверху вниз, полагая, что более точные СИ расположены выше менее точных. Реализация такой иерархии, в каждом конкретном случае, требует ее доработки, в основе которой должно быть подтверждение возможности определения действительных метрологических характеристик каждого из калибруемых средств измерений.

Отсутствие конкретики в определении калибровочной иерархии вызвано рядом причин:

- неизвестные требования к точности калибруемого СИ (заранее неизвестно, что пожелает заказчик калибровки);

- неизвестная точность эталона («калибратора»), которая может варьироваться в широких пределах (зависит от доступных ресурсов);

- неизвестная точность передачи единицы (шкалы) вниз от эталона калибруемому СИ (своя для каждой разрабатываемой методики калибровки с учетом точности калибруемого СИ и выбранного «калибратора»).

В поверочной схеме подобные проблемы выбора отсутствуют, поскольку в зависимости от требований к точности поверяемого СИ нормированы точность поверки и используемого эталона.

Проведенный сравнительный анализ подтверждает практическую невозможность выстраивания фиксированной калибровочной иерархии. Можно разработать только некоторые рекомендации по выстраиванию калибровочных иерархий в расчете на предполагаемое распространение типовых методик калибровки с ограниченным набором конкретных целей и задач калибровки СИ.

Калибровка мер, как СИ, которые не осуществляют преобразование сигнала измерительной информации, тут не рассматривается, поскольку требует выхода за содержание представленных определений калибровки.

Опираясь на приведенные выше определения калибровки, можно представить несколько видов типовых методик калибровки СИ, осуществляющих преобразование сигнала измерительной информации. Можно ограничиться рассмотрением калибровки СИ, преобразующих сигнал измерительной информации, на всем диапазоне, поскольку калибровка СИ в ограниченном диапазоне (в предельном случае – в одной точке) есть частные случаи.

Калибровка СИ с целью его последующей верификации является аналогом поверки, причем верификация по всем нормируемым характеристикам есть полный аналог поверки, о чем сказано в примечании 2 к определению поверки в РМГ 29. В последнем случае разработка методик калибровки и поверки СИ полностью совпадают.

Если целью исследования будет получение калибровочной характеристики средства измерений, например, в виде функции или графика и оценки неопределенности на всем диапазоне преобразования СИ, задача практически совпадает с его метрологической аттестацией.

Найденная в ходе исследований систематическая погрешность средства измерений позволит

вносить поправки с целью исключения составляющих систематической погрешности в любой точке диапазона преобразования СИ при его использовании. Корректное внесение поправок позволит избавиться от значимых систематических погрешностей, а неточности, вносимые средством измерений, будут определяться только случайными составляющими, оценку которых при выбранной доверительной вероятности можно представить как границу случайной погрешности или расширенную инструментальную неопределенность.

В подобном случае разработка методики калибровки СИ будет близка к разработке методики его метрологической аттестации. Точность метрологической аттестации СИ зависит от ее цели. Конкретную задачу может поставить заказчик калибровки, а решение достигается в процессе разработки и исследования методики калибровки СИ методом проб и ошибок. Достижение цели (получение удовлетворительной методики калибровки СИ) фиксирует заказчик калибровки по предъявлении разработчиком удовлетворительного результата. Задачей разработчика методики калибровки СИ является нахождение компромисса между желанием заказчика и имеющимися материально-техническими возможностями. Любое калибруемое СИ имеет ограниченную точность и даже весьма квалифицированно разработанное СИ, изготовленное с требуемой точностью, не может достичь уровня национального эталона.

Достаточно часто калибровку осуществляют не по всему континуальному диапазону средства измерений, а в ограниченном числе точек при существенно ограниченном числе повторных экспериментов в каждой из выбранных точек.

Хорошо разработанная и апробированная методика калибровки позволяет получить представительную информацию как о систематической погрешности калибруемого экземпляра СИ, так и о его случайных погрешностях (инструментальной неопределенности).

Такие задачи, как калибровка СИ на ограниченном участке диапазона измерений, калибровка СИ в одной точке диапазона измерений, калибровка для оценивания инструментальной неопределенности, калибровка при накладываемых на точность калибруемых СИ особых требований, в том числе целевой неопределенности тут не рассматриваются, поскольку не могут быть признаны типичными. При решении таких задач можно опираться на предложенные нами рекомендации, поскольку они охватывают достаточно широкий диапазон точностей от наивысшей при метрологической аттестации СИ до весьма умеренной при его верификации.

УДК 621.391

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ СОВМЕСТИМОСТЬ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Новицкая Е.Д.¹, Спесивцева Ю.Б.²

¹ОАО «Пеленг»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработана методика испытаний на электромагнитную совместимость аппаратуры, в которой измеряются уровни токов и напряжений кондуктивных помех, напряженность электрического поля.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, помехоэмиссия, методика испытаний.

METHOD FOR TESTING THE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF EARTH REMOTE SENSING EQUIPMENT

Novitskaya E.¹, Spesivtseva Y.²

¹JSC "Peleng"

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A methodology for testing the electromagnetic compatibility of equipment has been developed, in which the levels of conducted disturbances' currents and voltages, as well as the intensity of the electric field, are measured.

Key words: electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, testing methodology.

Адрес для переписки: Спесивцева Ю.Б., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: spesivtseva@bntu.by

В настоящее время большое внимание уделяется снижению уровней промышленных радиопомех, создаваемых аппаратурой (помехоэмиссия). Растущее число радиоэлектронных средств (РЭС) является главной причиной проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) – способности технического средства (ТС) функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим ТС [1]. Проблема ЭМС РЭС является одной из важнейших проблем радиоэлектроники. При рассмотрении ЭМС должен охватываться широкий круг вопросов – от специфических особенностей радиотехнических систем до конструирования и технологии производства, причем с учетом технических, экономических и организационных аспектов. Для решения задачи ЭМС анализируют механизмы мешающего взаимодействия, и на основании полученных данных разрабатывают рекомендации для обеспечения совместной работы РЭС. Подтвердить выполнение требований к ЭМС возможно только испытаниями [2].

Целью данной работы является разработка методики проведения автономных испытаний на ЭМС оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) дистанционного зондирования земли.

Целевая аппаратура для дистанционного зондирования Земли – оптико-электронная аппаратура, предназначенная для выполнения и получения изображений поверхности Земли, формирования информации, запоминания,

хранения и передачи на наземные комплексы приема. В состав ОЭА входят объектив и блок электронный.

Для космической техники требования ЭМС задаются заказчиком аппаратуры и прописываются в техническом задании в виде требований к конструкции, допустимых значений и норм технических характеристик, определяющих ЭМС. ЭМС должна обеспечиваться во всем космическом аппарате, а также с создаваемой им самим и заданной внешней электромагнитной обстановкой на всех этапах жизненного цикла.

Источники помех делятся на естественные и искусственные. Естественные источники – связаны с атмосферой: статистические разряды, магнитосфера, электромагнитные излучениями небесных тел. К искусственным источникам относятся электромагнитные помехи радиоэлектронных устройств, принцип работы которых связан с излучением электромагнитной энергии. Эти излучения являются источниками дополнительных космических помех и их следует учитывать при определении характеристик приемников.

В состав приборов для измерения радиопомех должны входить измеритель радиопомех с пиковым детектором и одно или несколько измерительных устройств со штатным кабелем, обеспечивающих измерения напряжения, силы тока, напряженности электрического и (или) магнитного полей.

Индустриальные радиопомехи для ОЭА измеряются в диапазоне частот 30 Гц – 1 Гц. Время

измерения определяется использованием аналогового приемника, к которому предъявляются достаточно жесткие требования. Минимальное время измерения – 15 с/ГГц.

Испытания проводятся в безэховой камере (БЭК), которая обеспечивает требуемую эффективность экранирования в заданном диапазоне частот [3]. ЭК состоит из конструктивно-унифицированных типовых элементов, которые собирают на месте установки. Измерительная площадка должна иметь пластину заземления и закрывать всю площадь между испытуемым ТС и антенной.

Настольные испытуемые ТС устанавливаются на столе из непроводящего материала высотой 0,8 м. Напольные испытуемые ТС должны быть установлены на непроводящей подставке толщиной 0,1 м. Использование непроводящих подставок исключает возможность случайного заземления испытуемого ТС и искажения поля. К испытуемому ТС подключают линии передачи сигналов и линии электропитания в соответствии с руководством по эксплуатации. Все кабели питания и межприборных соединений должны устанавливаться на высоте не менее 5 см относительно заземляющей пластины. Испытуемое ТС должно располагаться на расстоянии не менее 1 м от стен ЭК и на расстоянии 0,8 м от эквивалента сети [3].

Испытуемое ТС и вспомогательное оборудование должно располагаться в разных помещениях, как показано на рисунке 1.

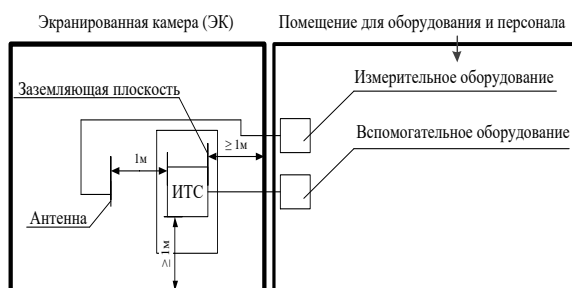


Рисунок 1 – Расположение ТС и оборудования

Уровень посторонних радиопомех на каждой частоте измерений, определенный при выключенном испытуемом ТС, должен быть не менее, чем на 10 дБ ниже нормы. Если уровень посторонних радиопомех на частоте измерения не соответствует этому требованию, но суммарное значение посторонних радиопомех и ИРП от испытуемого ТС не превышает нормы, то считаем, что испытуемое ТС соответствует норме на данной частоте измерений.

Испытания ТС на ИРП проводят при нормальных климатических условиях:

- температуре воздуха 20 ± 10 °С;
- относительной влажности 45–80 %;
- атмосферном давлении 630–800 мм.рт.ст.

Пиковые значения токов излучаемых помех, создаваемых ОЭА в цепях питания в диапазоне частот от 0,03 кГц до 10 кГц, не должны превышать значений, приведенных на рисунке 2.

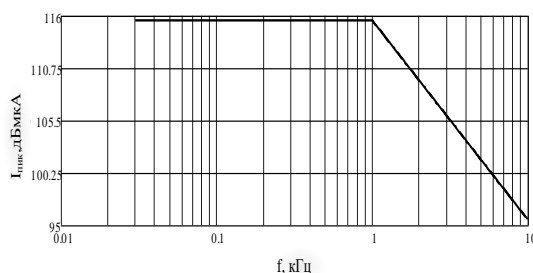


Рисунок 2 – Пиковые значения токов излучаемых помех, создаваемых ОЭА

Пиковые значения напряжения излучаемых помех, создаваемых ОЭА в цепях питания в диапазоне частот от 30 МГц до 10 МГц, не должны превышать значений на рисунке 3.

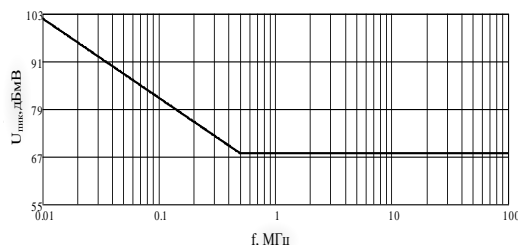


Рисунок 3 – Пиковые значения напряжения излучаемых помех, создаваемых ОЭА

Пиковые значения напряженности электрического поля излучаемых радиопомех не должны превышать 80 дБмкВ/м в диапазоне частот от 0,01 МГц до 1000 МГц. На частотах выше 30 МГц, соответствие пределам должно быть обеспечено как для горизонтально, так и для вертикально поляризованных волн. Средства измерений и испытательное оборудование:

- измерительный приемник;
- эквивалент бортовой питающей сети;
- модифицированная безэховая экранированная камера;
- антенна биконическая;
- контрольно-проверочная аппаратура;
- токосъемник;
- дифференциальный пробник напряжения;

На основе перечисленных требований и условий разработана методика испытаний на электромагнитную совместимость аппаратуры для дистанционного зондирования Земли, проведены испытания и сделано заключение, что ОЭА по уровням токов и напряжений излучаемых помех, напряженности электрического поля и соответствует требованиям технического задания.

Литература

1. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения : ГОСТ 30372-95.

2. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные. Методы испытаний технических средств – источников промышленных радиопомех: СТБ ГОСТ Р 51320-2001.

3. Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование для испытаний. Камеры экранированные. Классы, основные параметры, технические требования и методы испытаний: ГОСТ 30373-95.

УДК 665.347.8

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОДСОЛНЕЧНОГО МАСЛА

Собиров С.С., Спесивцева Ю.Б.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрены показатели качества, производство и контроль подсолнечного масла, разработка технологического регламента.

Ключевые слова: масло подсолнечное, окисление жиров, кислотное число, перекисное число, технологический регламент.

SUNFLOWER OIL QUALITY ASSURANCE

Sobirov S., Spesivtseva Y.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Indicators of quality, production and control of sunflower oil, development of technological regulations are considered.

Key words: sunflower oil, fat oxidation, acid number, acid number, technological regulations.

*Адрес для переписки: Спесивцева Ю.Б., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: spesivtseva@bntu.by*

Масложировая промышленность является важной частью индустрии Республики Узбекистан. Растительные масла являются ценным пищевым продуктом, поэтому обеспечение их высокого качества является актуальной задачей. В работе проведено исследование формирования качества подсолнечного масла от сырья до конечного продукта с целью создания производственного технологического регламента для одного из узбекских предприятий.

Регламент разрабатывался в соответствии с «Положением о технологических регламентах на производство продукции для масложировой отрасли Ассоциации «Узёгмойсаноат» № 5/19 от 13 мая, утвержденной решением «Научно-технического совета Ассоциации «Узёгмойсаноат» г. Ташкент.

Технологический регламент должен устанавливать детальный порядок производственных процессов, обеспечивая требования безопасности, минимальные затраты и получение продукции высокого качества. Технологический регламент применяется на протяжении всего производства, его предъявляют при подтверждении соответствия продукции требованиям технического регламента, при оформлении договоров, при инспекционных проверках надзорными органами.

Основной проблемой растительных масел является их интенсивное окисление, сопровождающееся накоплением токсичных веществ в процессе производства, хранения и использования. Склонность к окислению подсолнечного масла,

независимо от технологии получения обусловлена его жирнокислотным составом триглицеридов. Оно относится к линолево-олеиновому типу с преобладанием линолевой кислоты [1], поэтому для получения качественного масла на всех стадиях его производства должно быть созданы условия для минимальных окислительных изменений.

Качество подсолнечного масла контролируют согласно требованиям Общего технического регламента *UzTR.724-023:2020* «О безопасности масложировой продукции» и Технического регламента на масложировую продукцию *TP TC 024/2011* по физико-химическим и органолептическим и показателям, а идентификацию осуществляют по жирнокислотному составу. Формой оценки соответствия является государственный контроль (ревизия) и государственная регистрация новых видов масложировой продукции.

Качество растительного масла зависит от исходного сырья, технологических процессов, упаковки, реализации. Основными показателями качества и безопасности являются кислотное и перекисное число, которые должны контролироваться на всех этапах получения, переработки и хранения масла.

Качество семян значительно влияет на готовый продукт и зависит от влажности и засоренности в процессе сбора и условий хранения. При высушивании семян следует учитывать кроме температурного режима степень гидролитических и окислительных процессов в семенах. Рост кислотных и перекисных чисел происходит и на следующих стадиях производства масла: измельчения

ядра подсолнечника, при жарении мятки, при прессовании под действием температуры и давления в прессе с участием кислорода, во время первичной очистки, при перекачивании масла, его взвешивании и хранении. Наибольшее окисление происходит при первичной очистке и хранении масла на маслосливных станциях [2].

Рафинация масла состоит из нескольких этапов, где также изменяется степень окисления масла. Наиболее влияющей является стадия отбелки масла при рафинации [3].

Технологический регламент разрабатывался с учетом критически значимых факторов, влияющих на окислительный процесс подсолнечного масла. Документ включает описание сырья и реагентов, состав и режимы операций технологического процесса; методики контроля, способы защиты окружающей среды. В технологических регламентах вошла информация о проектной мощности предприятия, производительности линии рафинации, периодической дезодорации и вымораживания масла.

Готовым продуктом являются масла рафинированные недезодорированные и дезодорированные пресовые и экстракционные. Побочным продуктом процесса рафинации растительных масел является соапсток, соответствующий *O'zDSI2797:2013*.

Требования к подсолнечному маслу установлены в ГОСТ 1129-2013. Марки подсолнечного масла в зависимости от его обработки и значений показателей качества: рафинированное дезодорированное («Премиум», «Высший сорт», «Первый сорт»), рафинированное недезодорированное, нерафинированное. Установлены показатели и их нормы: прозрачность, запах и вкус, цветное число, кислотное число, массовая доля нежировых примесей, массовая доля фосфоросодержащих веществ, мыло, массовая доля влаги и летучих веществ, температура вспышки экстракционного масла, перекисное число, анизидиновое число, холодный тест.

Технологический процесс производства подсолнечного масла на предприятии включает следующие этапы: прием и подготовка семян, очистка и калибровка семян, холодный пресс, горячий пресс, фильтрация, рафинирование и дезодорация масла, упаковка и хранение готовой продукции. Для каждой стадии производства подсолнечного масла выделены контролируемые параметры и их предельные значения, а также выбраны методы измерений. Некоторые из них перечислены ниже.

Сырье. Влажность семян подсолнечника должна быть не более 10 %. Контроль методом термической вакуумной сушки в соответствии с ГОСТ 13586-78 «Семена масличных культур. Методы определения влажности». Кислотное число – не более 2 мг КОН/г. Контроль титриметрическим

методом по ГОСТ 10858-77 «Семена масличных культур. Промышленное сырье. Методы определения кислотного числа масла».

Подготовка семян к экстракции. Контролируемый параметр: размер семян. Предельные значения: диаметр 6–8 мм, длина 12–20 мм. Контроль визуальный. Температура семян 50–70 °С. Контроль термометром по ГОСТ 28498-90 «Изделия нефтеперерабатывающие и масложировые. Методы определения температуры».

Холодный пресс. Температура масла – не более 40 °С. Измерение термометром.

Экстракция масла. Температура экстракции 50–70 °С. Контроль термометром. Содержание масла в жмыхе – не более 2,5 %. Метод экстракции с помощью растворителя по ГОСТ 13979.2-94 «Жмыхи, шроты и горчичный порошок».

Очистка масла. Температура очистки 90–120 °С. Контроль термометром. Кислотное число не более 2 мг КОН/г. Контроль титриметрическим методом.

Фильтрация (фракционирование) масла. Потеря масла в жмыхе – не более 0,5 %. Контроль методом экстракции с помощью растворителя. Цветовой показатель – не более 15 усл.единиц по йодной шкале. Метод сравнения интенсивности окраски масла и стандартных растворов йода по ГОСТ 5477-93 «Масла растительные. Методы определения цветности».

В качестве направления по повышению качества масла рассматривается возможность использования для контроля кислотных и перекисных чисел методов оперативной диагностики, поскольку традиционные методы значительно зависят от квалификации оператора, состава реактивов и требуют продолжительного времени, что является особенно существенным для стадий рафинации и реализации масла. Одним из таких методов является электрофизический [4]. Окисление жиров атмосферным кислородом приводит к изменению химического состава масла и его электрофизических свойств, что позволяет делать выводы о показателях качества масла.

Литература

1. Актуальные вопросы управления качеством растительного масла / Т.В. Пилипенко [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. – 2011. – № 28. – С. 183–188.
2. Золочевский, В.Т. Окисление масла при переработке маслосемян и при хранении масла / В.Т. Золочевский // Масла и жиры. – 2008. – № 11. – С. 22–26.
3. Золочевский, В.Т. Окисление масла при отбелке в схемах физической рафинации / В.Т. Золочевский // Масла и жиры. – 2009. – № 4. – С. 23–26.
4. Пилипенко, Т.В. Возможность использования электрофизических методов для идентификации и контроля качества растительных масел / Т.В. Пилипенко, Л.П. Нилова, Н.И. Пилипенко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2014. – Т. 2, № 2 – С. 41–49.

УДК 531.711

ОЦЕНИВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕВЫХ МЕР ДЛИНЫ 1 РАЗРЯДА

Волчок О.П., Спесивцева Ю.Б.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены некоторые элементы методики оценивания неопределенности измерения концевых мер длины 1 разряда с помощью оптической интерферометрии.

Ключевые слова: единица длины – метр, концевые меры длины, оптическая интерферометрия, неопределенность измерения.

UNCERTAINTY EVALUATION FOR MEASUREMENTS OF PRIMARY LENGTH STANDARDS

Volchok O., Spesivtseva Y.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Some elements of the methodology for uncertainty evaluation of measurements of primary length standards of 1st order using optical interferometry were examined.

Key words: unit of length - meter, gauge blocks, optical interferometry, measurement uncertainty.

Адрес для переписки: Ю.Б. Спесивцева, пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: spesivtseva@bntu.by

Единицей измерения длины системы СИ является метр – длина волны, проходящая светом в вакууме за время, равное $1/299\,792\,458$ секунды и воспроизводимая при помощи йод-стабилизированных гелий-неоновых лазеров. Размер единицы длины-метра передается плоскопараллельным концевым мерам длины с помощью оптической интерферометрии. Концевая мера длины – эталонная мера длины, выполненная в форме прямоугольного параллелепипеда с нормируемым размером между измерительными плоскостями [1]. Оптическая интерферометрия предлагает метод определения количества длин световых волн, которые укладываются на мере длины. Длина меры в этом случае принимается равной длине перпендикуляра из контрольной точки на мере длины к плоскопараллельной пластине, изготовленной из подобного материала, к которому притерта мера.

Сущность метода состоит в определении длины плоскопараллельных концевых мер с помощью световых длин волн, содержащихся в искомой длине концевой меры. Чтобы определить длину концевой меры, надо установить число интерференционных полос, расположенных между поверхностью вспомогательной пластины, к которой притерта концевая мера и центром измерительной плоскости меры. Номинальная длина концевой меры является известной величиной, поэтому от непосредственного подсчета полос, который являлся бы достаточно сложным, отказываются. С помощью интерферометра Кестерса измеряют отклонение от номинального значения длины концевой меры. Учитываются лишь доли интервалов, на которые смещены появляющиеся на вспомогательной пластине и на измерительной

плоскости концевой меры системы интерференционных полос. Измерения последовательно производятся при различных длинах волн, в зависимости от применяемого источника излучения. Каждое измерение дает дробную долю интервала между полосами. Дробная доля порядка интерференции определяется визуально по смещению интерференционных полос на измерительной поверхности концевой меры и на поверхности вспомогательной пластины, притертой ко второй измерительной поверхности концевой меры.

Результат измерения физической величины должен быть всегда представлен с количественной характеристикой качества результата измерений, чтобы можно было оценить его достоверность, а также обеспечить возможность сопоставления результатов измерений друг с другом и со значениями, указанными в НД и ТНПА. Неопределенность измерений является такой количественной мерой точности результата измерений и выражает степень доверия, с которой может допускаться, что значение измеренной величины в условиях измерений лежит внутри определенного интервала значений [2]. Некоторые элементы оценивания неопределенности измерений концевых мер длины 1 разряда приведены ниже.

Источники неопределенности измерения мер длины могут быть разделены на те, которые зависят от длины и которые обусловлены краевыми эффектами. В большинстве случаев меры длины в пределах серии произведены с одинаково высоким качеством обработки торцевых поверхностей и обладают одинаково хорошей геометрией, но необходимо рассматривать характеристики краевых эффектов и изменение неопределенности в

зависимости от номинальной длины. По этой причине источники неопределенности объединены в две группы: краевые воздействия и воздействия, зависящие от длины. Краевыми эффектами являются те, которые зависят только от качества оптических поверхностей меры длины и их взаимодействия с измерительной системой, и они по определению не зависят от длины калибруемой меры. Например, притираемость является краевым эффектом. С другой стороны, эффекты, зависящие от длины, проявляются вследствие объемных свойств меры длины и окружающей среды (например, воздуха) и по определению не зависят от краевых эффектов. Тепловое расширение является примером воздействий, зависящих от длины.

Для сложных измерений, таких как интерферометрия мер длины, является целесообразным составлять модели измерений таким образом, чтобы параметры влияния были в наиболее возможной степени изолированы, но тем не менее отражали относительное влияние на другие параметры для целей оценки корреляции [3]. Для составления модели измерений длины концевой меры был проведен анализ входных величин, которые оказывают влияние на результат измерений.

Модель измерения длины концевой меры:

$$L = L_n + \delta L + l_d + l_\lambda + l_k + l_T + l_m + l_n, \quad (1)$$

где L – результат измерения длины концевой меры, мм; L_n – номинальная длина концевой меры, мм; δL – среднее арифметическое отклонений срединной длины концевой меры, мкм; l_d – ошибка считывания доли интерференционной полосы; l_λ – поправка на длину волны, мкм; l_k – поправка из-за особенностей конструкции оптической схемы интерферометра Кестерса и его элементов, мкм; l_T – поправка на температурную коррекцию для концевой меры, мкм; l_m – поправка, которая может быть сопоставлена толщине притирочного слоя; l_n – поправка на отличие длин световых волн в условиях измерений от их длин в нормальных условиях, мкм.

Неопределенности входных величин, указанные в модели измерений, в свою очередь состоят из нескольких составляющих. Каждая величина входящая в неопределенность тоже измерена с неопределенностью или ей приписана неопределенность, указанная в компетентных источниках или неопределенность измерения могла быть определена опытным путем. Соответственно при более детальном анализе мы получаем сложную си-

стему уравнений для расчета каждой составляющей модели измерений. Ниже приведен пример анализа входных величин l_k , L_T . Входная величина l_k рассчитывается по формуле:

$$l_k = \left(\frac{b^2 + h^2}{24f^2} + \frac{\Delta b^2 + \Delta h^2}{2f^2} \right) L_n, \quad (2)$$

где b – ширина входной щели, мм; h – длина входной щели, мм; f – фокусное расстояние объектива коллиматора; L_n – номинальная длина концевой меры, мм; Δb и Δh_n – несовпадение оптических осей интерферометра с источником излучений.

Таким образом, стандартная неопределенность входной величины l_k состоит из нескольких параметров, которые связаны с размерами входной щели коллиматора, фокусным расстоянием объектива коллиматора и несовпадением оптических осей интерферометра с источником излучений.

Входная величина l_T рассчитывается:

$$l_T = \alpha L_n \cdot \Theta, \quad (3)$$

где α – температурный коэффициент линейного расширения измеряемой концевой меры, равный $12,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; L_n – номинальная длина концевой меры, мм; Θ – отклонение температуры концевой меры от нормальной, °C;

Оценка неопределенности входной величины l_T зависит от таких величин как тепловой коэффициент линейного расширения концевой меры длины, номинальной длины концевой меры и отклонения температуры концевой меры от 20 °C.

Входная величина l_n рассчитывается:

$$l_n = [0,932(t - 20) - 0,358(p - 760) + 0,056(e - 10)] L_n \cdot 10^{-6}, \quad (4)$$

где t – температура воздуха в термостате интерферометра, °C; p – атмосферное давление воздуха, мм рт.ст.; e – влажность воздуха, мм рт.ст.

Оценка неопределенности входной величины l_n зависит от таких величин как температура, давление и влажность воздуха.

Литература

1. Меры длины концевые плоскопараллельные. Технические условия : ГОСТ 9038-90.
2. Ефремова, Н.Ю. Оценка неопределенности измерений / Н.Ю. Ефремова. – Минск : БелГИМ, – 2003. – 50 с.
3. Decker, J.E. Uncertainty Evaluation for the Measurement of Gauge Blocks by Optical Interferometry / J.E. Decker, J.R. Pekelsky // Metrologia. – 1997. – P. 479–493.

УДК 371.3

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛОМ ПУТЕМ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ

Соломахо В.Л., Степанова Е.Л.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Безопасная эксплуатация опасных и потенциально опасных производственных объектов накладывает определенные обязательства перед персоналом к обладанию знаниями, навыками и другими компетенциями. В статье представлена работа по формированию модели компетенций, позволяющей провести оценку персонала, работающего в газовой отрасли.

Ключевые слова: осведомленность, компетентность, оценка персонала, промышленная безопасность, модель компетенций.

IMPROVING PERSONNEL MANAGEMENT MECHANISMS BY CLUSTERING PROFESSIONAL COMPETENCIES

Solomakho V.L., Stepanova E.L.

*Belarusian State Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstraction. The safe operation of hazardous and potentially hazardous production facilities imposes certain obligations on personnel to possess knowledge, skills and other competencies. The article presents work on developing a competency model that allows for the assessment of personnel working in the gas industry.

Key words: awareness, competence, personnel assessment, industrial safety, competency model.

*Адрес для переписки: Степанова Е.Л., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
e-mail: Stepanova.ekateryna.sk@gmail.com*

Газовая отрасль в Республике Беларусь является динамично развивающейся, технологически сложной сферой промышленности. Ее специфика заключается в том, что безопасная эксплуатация опасных и потенциально опасных производственных объектов напрямую зависит от профессионализма персонала, его обслуживающего, что подразумевает обладание высоким уровнем компетенций, а также их абсолютную осведомленность в профессиональных вопросах. В поддержку сказанного Министерством по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь на законодательном уровне закреплены требования и обязательства по подготовке и проверке знаний персонал всех уровней в области промышленной безопасности.

Так, в вопросах подготовки персонала, освоению знаний, умений, личностных качеств предъявляются более чем высокие требования. Поэтому важным направлением совершенствования системы управления персоналом в области промышленной безопасности является комплексный подход к оценке их профессиональных компетенций, характеризующийся не только традиционной оценкой знаний, но и определением уровня достижения профессионально значимых качеств, которые могут выступать «гарантом» безаварийного обслуживания опасных и потенциально опасных производственных объектов. Определение уровня достижения профессиональных компетенций сводится к процессу оценивания персонала путем присвоения качественного и (или) количественного значения каждой компетенции.

Оценка персонала достаточно изучена зарубежными и отечественными специалистами и предлагает всевозможные подходы к ее реализации. Большинство из них строятся на том основании, что критерии оценки должны рассматриваться в контексте конкретной организации. Так, для организаций газовой отрасли ключевыми факторами для оценки компетентности и осведомленности персонала являются – уровень знаний и профессиональных навыков, осознанная ответственность за результаты труда, психологическая подготовленность и устойчивость, навыки действий в стрессовых и аварийных ситуациях и так далее. Максимально полный набор характеристик, позволяющий работнику успешно выполнять функции, соответствующие его должности мы будем понимать, как модель компетенций [2].

Для создания модели компетенций предлагается структуризация в группы компетенций и их последующий кластерный анализ (кластеризацию). Корректное построение модели позволяет установить взаимосвязь между набором компетенций и формированием осведомленности персонала. В тоже время для эффективного применения модель должна иметь простую структуру, быть ясной и легкой для применения.

Все методики оценки можно условно сгруппировать в три основных метода:

1. Прогностический метод строится на аналитической оценке, формируемой на базе анализа личных данных исполнителя, письменных или устных характеристик, мнения и отзывов

руководителей и коллег, индивидуальных бесед, психологических тестов.

2. Практический метод предполагает оценку профессиональной пригодности работника к исполнению служебных обязанностей, которая определяется на основании всевозможных проверок знаний, аттестаций, результатов практической работы в рамках его служебных обязанностей.

3. Имитационный метод предполагает моделирование «искусственно созданных» производственных ситуаций (это могут быть аварии, инциденты, конфликтные ситуации и т. п.), эффективность разрешения которых положена в основу оценки профессиональной компетенции исполнителей [3].

Работы по формированию модели компетенций должны выполняться по следующему алгоритму:

1. Уточнение (дифференциация) функциональных обязанностей.

2. Проектирование модели компетенций: выделение тех стандартов поведения, которые обуславливают максимальный результат в деятельности сотрудников.

3. Кластеризация компетенций, которые будет содержать модель.

4. Квалиметрическое структурирование компетенций в модели (определение веса компетенции).

5. Определение количественной/качественной оценки компетенции.

6. Получение комплексных оценок.

7. Формирование модели.

8. Корректировка профиля компетенции под конкретный вид профессиональной деятельности.

9. Апробация модели.

В зависимости от варианта оценки фиксируются качественные (уровни компетенции) и количественные показатели. Несомненно, разработка и внедрение модели компетенций дает практическую выгоду для организации в целом:

– позволяет на этапе подбора будущего сотрудника оценить на соответствие требуемым

требованиям, а также определяет четкие критерии оценки работника по результатам испытательного срока и завершения адаптации;

– отражает объективные требования к сотруднику, занимающему определенную должность;

– оценка соответствия профилю компетенций может являться основой для системы материального стимулирования и др.

Строгое структурирование и алгоритмизация процесса оценки компетенций создает фундаментальную базу для автоматизации данного процесса. Автоматизация оценки компетенций – это логичный процесс оптимизации механизмов управления персоналом путем кластеризации профессиональных компетенций, создающих основу для наращивания потенциала организации [4]. Прикладными задачами в рамках исследования является описание отдельного приложения, работающего в составе информационной системы, включая его главные функциональные элементы, алгоритмы и логику их взаимодействия.

Литература

1. Системы менеджмента качества. Требования : СТБ ISO 9001-2015. – Введ. 01.03.16. – Минск : Госстандарт: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2015. – 36 с.

2. Котов, Д.В. Совершенствование метода оценки персонала в нефтегазовой отрасли / Д.В. Котов, Р.Т. Вахитов // Вестн. Уфим. гос. нефтян. техн. ун-та. Наука, образование, экономика. Сер.: Экономика. – 2020. – № 2. – С. 111–121.

3. Кибанов, А.Я. Управление персоналом: Теория и практика. Оценка и отбор персонала при найме и аттестации, высвобождение персонала : учебно-практическое пособие / А.Я. Кибанов. – М. : Проспект, 2013. – 80 с.

4. Лукина, М.М. Технология автоматизированной системы управления кадрами с использованием модели компетенций [Электронный ресурс] / М.М. Лукина // Наукоедение – 2017. – № 2. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-avtomatizirovannoy-sistemy-upravle-niya-kadrami-s-ispolzovaniem-modeli-kompetentsiy/vie-wer>.

УДК 539.172.12

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРОМЕТРА MKS-AT1315 ДЛЯ КОНТРОЛЯ РАДИОНУКЛИДОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА РАДИОФАРМПРЕПАРАТОВ
Бринкевич Д.И.¹, Гузов В.Д.², Киевицкая А.И.³, Кийко А.А.², Кийко А.Н.⁴, Бумай Ю.А.⁵

¹Белорусский государственный университет

²УП «Атомтех»

³Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова

⁴Белорусский государственный институт метрологии

⁵Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Спектрометр MKS-AT1315 позволяет оперативно выявлять технологические радионуклиды в процессе производства РФП на основе ¹⁸F как в регенерированной воде, так и в картриджах сорбционной очистки. Оценку содержания нежелательных радионуклидов целесообразно проводить по пику с максимумом 130 кэВ, обусловленному изотопом кобальта ⁵⁷Co, который является доминирующим нежелательным радионуклидом.

Ключевые слова: радиофармпрепарат, радионуклиды, сцинтиляционный спектрометр MKS-AT1315, регенерат воды [¹⁸O]H₂O.

APPLICATION OF THE MKS-AT1315 SPECTROMETER FOR CONTROL OF RADIONUCLIDES FORMED DURING THE PRODUCTION PROCESS OF RADIOPHARMACEUTICALS
Brinkevich D.I.¹, Bumai Y.A.⁵, Kiyavitskaya H.I.³, Kiyko A.N.⁴, Guzau V.D.², Kiyko A.A.²

¹Belarusian State University

²SPE "Атомтех"

³International Sakharov Environmental Institute

⁴Belarusian State. Institute of Metrology

⁵Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The MKS-AT1315 spectrometer allows you to quickly identify technological radionuclides during the production of ¹⁸F-based radiopharmaceuticals both in regenerated water and in sorption purification cartridges. It is advisable to assess the content of unwanted radionuclides based on the peak with a maximum of 130 keV, caused by the cobalt isotope ⁵⁷Co, which is the dominant unwanted radionuclide.

Key words: radiopharmaceutical, radionuclides, scintillation spectrometer MKS-AT1315, water [¹⁸O]H₂O regenerate.

Адрес для переписки: Бринкевич Д.И., пр. Независимости, 4, г. Минск, 220030, Республика Беларусь
e-mail: brinkevich@bsu.by

В соответствии с требованиями *GMP (Good Manufacturing Practic)* при производстве радиофармпрепаратов (РФП) должен проводиться ежедневный контроль примесных радионуклидов (РН) в готовом лекарственном препарате. Кроме того [1], загрязнение расходных материалов радиохимического синтеза побочными радионуклидами приводит к увеличению номенклатуры и объемов жидких и твердых РАО и требует периодического выборочного контроля их радионуклидного состава. При интенсивном ежедневном производстве РФП (до 3 синтезов в день) в ПЭТ-центре накапливается большое количество твердых и жидких радиоактивных отходов, которые представляют собой картриджи сорбционной очистки, регенерированную воду [¹⁸O]H₂O и, в меньшей степени, растворы для дезактивации оборудования [2–4]. Кроме того, требуется мониторинг сменных деталей циклотрона с целью оценки доз, получаемых персоналом [5]. Ранее [3] была проведена идентификация γ -излучающих радионуклидов и определение их

активности в регенерированной воде и твердых РАО с использованием спектрометра с детектором на особо чистом германии. При рутинном производстве РФП, когда радионуклидный состав РАО известен, разрешающая способность такого спектрометра избыточна. Для контроля примесных РН в рутинном производстве РФП целесообразно использовать более дешевые спектрометры со сцинтиляционными детекторами. Для качественной работы с этими спектрометрами необходимо установить принадлежность пиков в γ -спектрах, полученных на сцинтиляционном спектрометре, с конкретными радионуклидами.

С этой целью нами были проведены одновременные измерения γ -спектров одних и тех же образцов жидких и твердых РАО на ППД-спектрометре ORTEC и на отечественном сцинтиляционном спектрометре MKS-AT1315.

Материалы и методы измерений. Нарработку радионуклида ¹⁸F в условиях рутинного производства РФП осуществляли на ускорителе Cyclone 18/9 HC (IBA, Бельгия) при облучении 18

МэВ протонами воды, обогащенной по кислороду ^{18}O до 97 % («Центр молекулярных исследований», Россия). Использовали ниобиевую мишень *Nirta Fluor (IBA, Бельгия)* объемом 3,2 мл. Время облучения мишени за один производственный цикл составляло 60-140 минут, ионный ток на мишени – 75–80 μA .

Сцинтилляционный спектрометр МКС-АТ1315 обеспечивает регистрацию гамма-излучения в диапазоне энергий от 50 до 3000 кэВ и бета-излучения в диапазоне граничных энергий от 150 до 3500 кэВ. Чувствительность для ^{137}Cs в геометрии «Дента» составляет $8,87 \cdot 10^{-3}$ имп-л/(с·Бк), чувствительность для ^{90}Sr в геометрии 0,03л – $3,5 \cdot 10^{-3}$ имп-л/(с·Бк). Одновременно определение активности γ -излучающих радионуклидов выполняли с использованием спектрометра на основе чистом германии: детекторная система *GEM40-83/DSPEC jr 2.0*; энергетический диапазон 14,5–2911,4 кэВ; разрешение 0,182 кэВ/канал. Из-за высокой активности ^{18}F измерения проводили не менее, чем через двое суток после последнего облучения.

В качестве образцов для измерений были использованы твердые РАО (картриджи сорбционной очистки *QMA, Alumina* и *SCX*, использовавшиеся в процессе производства РФП), а также 6 проб объемом 1 мл воды H_2^{18}O , облученной в разные дни дозами 4800–9900 мкА·мин и прошедшей выделение ^{18}F на картридже *QMA* (далее – регенерат) и растворы, полученные после дезактивации оборудования

Эксперимент. На рисунке 1 приведены сравнительные γ -спектры регенерата. Нижний спектр измерен на ППД-детекторе, верхний – на спектрометре МКС-АТ1315. Результаты измерений активностей долгоживущих радионуклидов на гамма-бета-спектрометре МКС-АТ1315 и при использовании спектрометра на основе чистом германии практически совпадали. Во всех сцинтилляционных спектрах наблюдалось 9 пиков с максимумами при 130, 510, 840, ~1030, 1250, 1350, 1750, 2050 и 2600 кэВ (рисунок 1). Наиболее интенсивные из них – низкоэнергетические. При увеличении энергии ширина пика возрастает, а его интенсивность снижается. идентифицировать радионуклиды, ответственные за указанные выше пики. Пик 1 с максимумом энергии 130 кэВ обусловлен изотопом кобальта ^{57}Co , имеющим две интенсивных линии γ -излучения с энергиями равными 122,1 и 136,5 кэВ. Пик 2 с максимумом порядка 511 кэВ обусловлен аннигиляцией позитрона. Она присуща всем β^+ -излучающим изотопам и для

идентификации технологических радионуклидов в данном случае не пригодна. Отметим, что по этому пику обычно определяется интенсивность целевого радионуклида ПЭТ диагностики ^{18}F . Пик 3 связан с изотопом марганца ^{54}Mn , имеющим энергию излучения гамма-квантов равную 834,85 кэВ. В этом же диапазоне находятся энергии излучения изотопов кобальта ^{56}Co (846,8 кэВ) и ^{57}Co (810,8 кэВ). Можно с большой долей уверенности утверждать, что пик 4 с максимумом вблизи 1100 кэВ обусловлен изотопом цинка ^{65}Zn , поскольку пики других технологических РН в этом диапазоне отсутствуют. Слабоинтенсивные пики с энергиями ~1030, 1250, 1350, 1750, 2050 и 2600 кэВ, вероятнее всего, связаны с ^{56}Co .

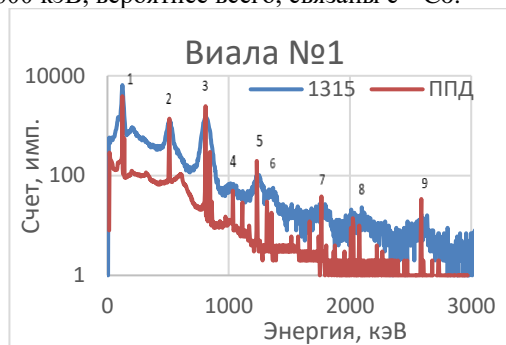


Рисунок 1 – γ -спектры регенерата

Гамма-бета-спектрометр МКС-АТ1315 позволяет оперативно выявлять нежелательные технологические радионуклиды в процессе производства РФП на основе ^{18}F как в регенерированной воде, так и в картриджах сорбционной очистки. Причем оценить содержание нежелательных технологических радионуклидов можно по пику с максимумом вблизи 130 кэВ, обусловленному изотопом кобальта ^{57}Co , который является доминирующим нежелательным РН.

Литература

1. Очистка ^{18}F фторида от долгоживущих радионуклидов при производстве ^{18}F фтордезоксиглюкозы / А.А. Иванович [и др.] // Медицинская физика. – 2018. – № 4(80). – С. 59–65.
2. Reprocessing of Irradiated ^{18}O H_2O under the Conditions of a PET Center / S.D. Brinkevich [et al.] // Radiochemistry. – 2019. – Vol. 61, N 4. – P. 483–490.
3. Brinkevich, S.D. Activation Radionuclides in the Process of Irradiation of a Niobium Target at the Cyclone 18/9 HC Cyclotrone / S.D. Brinkevich, D.I. Brinkevich, A.N. Kiyko // Physics of Atomic Nuclei. – 2020. – V. 83, N 12. – P.1732–1737.
4. Separation of Long-Lived Radionuclides on QMA Light Anion-Exchange Cartridge in Manufacture of Radiopharmaceutical Preparations Based on ^{18}F / V.O. Krot [et al.] // Radiochemistry. – 2021. – V. 63, № 2. – P. 235–242.

УДК 658.62

КВАЛИМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА НА ПРЕДПРИЯТИИ Токарь О.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Определены показатели качества процесса, требования к экспертам, дана оценка процессов на примере кожевенного предприятия.

Ключевые слова: квалиметрия, качество, процесс, экспертное оценивание.

QUALIMETRIC ASSESSMENT OF PROCESS QUALITY AT THE ENTERPRISE Tokar O.V.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Process quality indicators and requirements for experts were determined, and processes were assessed using the example of tannery processes.

Key words: qualimetry, quality, process, expert assessment.

*Адрес для переписки: Токарь О.В., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: tokar.o@bntu.by*

От качества прохождения производственного процесса в организации во многом зависит качество производимой продукции. Одним из подходов к изучению качества производственных процессов является их квалиметрическая оценка, позволяющая определить уровень качества в количественном выражении. Для этого должны быть установлены единичные показатели качества процесса, на основании которых может быть сформирован комплексный показатель качества.

Показатели качества процессов могут быть определены различными способами, например, анализом научных публикаций, а также с помощью экспертов в области системы менеджмента качества.

Определяющими показателями качества производственного процесса кожевенного производства могут выступать его непрерывность в рамках выполнения определенной совокупности операций, автоматизация, бездефектность, соответствие современным технологиям, обособленность рабочих мест, выполнение рабочих планов. Один из вариантов выполнения алгоритма вычислений по данным параметрам изложен в источнике [1].

В качестве объекта изучения были выбраны процессы заключительной стадии кожевенного производства белорусского предприятия в городе Минске. Кожевенное производство является стратегической отраслью белорусской экономики, что объясняет внимание к ней в том числе и с позиций оценки качества продукции. Безусловно, на работу предприятия влияют внешние риски, связанные с экономическими санкциями, использованием импортных химических составляющих производственного процесса, проблемы экологического характера и охраны труда. Однако оптимизация самих процессов также должна быть под пристальным вниманием специалистов. Для оценки были выбраны

процессы дубления, додубливания, крашения и жирования, для которых были рассчитаны показатели непрерывности, автоматизации, специализации, бездефектности, прогрессивности, выполнения планов.

Показатель непрерывности определяется как показатель соотношения длительности вспомогательных операций к длительности производственного процесса. Под специализацией понимается количество обособленных рабочих мест, рассчитанное как соотношение числа рабочих к количеству операций, которое вычитается из единицы. Соотношение фактического выпуска продукции к плановому отразит показатель выполнения планов. Для получения показателя автоматизации необходимо рассчитать трудоемкость работ, выполняемых автоматически и выполняемых вручную и получить их соотношение. Бездефектность можно выявить как соотношение количества бракованной продукции к общему числу продукции (бракованной и годной), которое необходимо вычесть из единицы. Для оценки прогрессивности необходимо выявить технологии, относящиеся к выполнению производственного процесса, которые способствуют снижению монотонности труда и повышению производительности. Полученное количество вычитается из общего числа операций данного процесса, соотносится с ним и вычитается из единицы. Все параметры должны быть рассчитаны за определенный промежуток времени [1].

При разработке комплексной оценки качества процессов необходимо оценивать квалификацию специалистов, выступающих экспертами [2]. Квалификация подразделяется на специальную, отражающую знания эксперта в выбранной области, и квалиметрическую, характеризующуюся знанием принципов и понятий количественной оценки качества объекта.

Оценивать квалификацию по специальности необходимо с помощью анкеты, которая содержит вопросы относительно знания литературы по вопросам производства продукции, новых патентов, внутрифирменной информации, а также относительно степени знакомства с самой продукцией и участия в ее исследовании и разработке. Для оценки использовалась балльная шкала. Для определения компетентности эксперта необходимо учитывать и его квалиметрическую грамотность, для чего рекомендуется использовать вопросы о знакомстве с понятиями и принципами квалиметрии, о наличии у эксперта публикаций квалиметрической тематики.

Всем перечисленным показателям качества специалиста как эксперта методом предпочтений были присвоены весовые коэффициенты, отражающие степень их вклада. Для более полного охвата качества эксперта рекомендуется проводить не только самооценку, но и взаимооценку или оценку эксперта руководителем экспертной группы.

Практика показывает, что показатель комплексной оценки качества эксперта равный 5 (по шкале от 0 до 10) является допустимым для того, чтобы эксперт соответствовал норме. Оценка эксперта происходила как с использованием прямых вопросов в анкете, так и скрытых в форме закрытых или открытых тестов.

На практике было проведено оценивание потенциальных экспертов в области процессов кожевенного производства. Результаты показали, что из найденных специалистов только 30 % прошли порог допустимости к экспертизе. Это говорит о том, что предварительный список экспертов должен быть подготовлен 1 к 3 по количественному составу.

Принципы квалиметрии определяют, что показатели качества процесса или продукции характеризуются двумя числовыми параметрами – показателем качества и коэффициентом весомости для показателя, идентифицирующего его среди остальных. С помощью опроса экспертов были установлены весовые коэффициенты для каждого из показателей с учетом модели риска экспертным методом оценивания весомостей показателей (метод парных сравнений).

По алгоритму метода парных сравнений респондент попарно сопоставляли показатели качества процессов, для каждого показателя рассчитывалась частота предпочтения. На основании суммарной частоты и общего количества проведенных сравнений рассчитывался весовой коэффициент для показателей качества.

Наибольшей значимостью обладают показатели бездефектности и выполнения планов, наименьшей – обособления рабочего места. В результате вычисления комплексного показателя

качества, полученного путем суммирования произведений значения каждого показателя и весового коэффициента, определено, что более лучшие показания имеют процессы дудубливания (0,59) и жирования (0,58), наименьшие – дубление (0,52) и крашения (0,53).

Также для выявления недостатков, мешающих оптимальному течению процесса, был проведен их анализ методом Парето [3].

По правилу Парето 80 % достижений получены в результате 20 % усилий, 80 % проблем появляются из-за 20 % причин. Для построения диаграммы Парето на основе количественных данные, найденных с помощью оценки процесса специалистами, рассчитывалась доля в процентах по каждому параметру и накопленный процент. С использованием опроса работников были определены типичные проблемы производственных процессов за изучаемый период.

Диаграмма Парето позволила распределить показатели на три подгруппы: группа А – группа успешных показателей; группы В и С – группы проблемных показателей. Распределение показателей по группам происходило с помощью точки пересечения горизонтальной линии и кривой накопленного процента. Наибольший вес получили несоответствие сортов голя на этапе дубления и простои из-за сбоев оборудования.

В случае отклонения от значения комплексного показателя при внесении изменений в процесс необходимо проводить новые расчеты, направление отклонения от полученного значения комплексного показателя покажет ухудшение или улучшение процесса.

Также полученная количественная оценка позволяет определить пути улучшения течения процесса, например, увеличение специализации рабочих мест в процессе крашения, непрерывность течения процесса при дудубливании и т. д. Автоматизация и использование квалиметрической оценки качества выполнения процессов работниками позволит в режиме реального времени увидеть сбой в работе, простои и оперативно их устранить.

Литература

1. Анцев, В.Ю. Методика квалиметрической оценки качества производственных процессов / В.Ю. Анцев, Н.А. Витчук // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2017. – Вып. 8, Ч. 1. – С. 324–330.
2. Серенков, П.С. Исследование достоверности методов экспертного оценивания / П.С. Серенков, В.М. Романчук, Н.Н. Иванова // Метрология и приборостроение. – 2016. – № 1(72). – С. 22–30.
3. Салахов, Ф.Н. Диаграмма Парето и ABC-анализ – эффективный инструмент управления качеством продукции / Ф.Н. Салахов // Вестник КГУ. – 2008. – № 3. – С. 78–80.

УДК 388.46

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КОНЦЕПЦИЙ КАК ФАКТОРА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ В СФЕРЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Третьякова Е.С., Хамко Ю.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. С учетом быстрого развития технологий и изменений в потребительском поведении, компании и предприятия, занимающиеся производством и продажей приборов, сталкиваются с острой необходимостью применения инновационных подходов для привлечения и удержания клиентов. В статье рассматриваются различные методы маркетинга, такие как: цифровой маркетинг, контент-маркетинг, социальные сети, аналитика данных и персонализация. Особое внимание уделяется применению современных технологий, таких как: искусственный интеллект, интернет вещей (IoT) и виртуальная реальность (VR), для создания инновационных маркетинговых стратегий. В статье также разбираются вопросы и препятствия, с которыми сталкиваются организации, при внедрении новых приемов маркетинга в приборостроении.

Ключевые слова: приборостроение, цифровой маркетинг.

USING MODERN CONCEPTS AS A FACTOR OF INCREASING THE EFFICIENCY OF ENTERPRISES IN THE FIELD OF INSTRUMENT ENGINEERING

Tretyakova E.S.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. With the rapid development of technology and changes in consumer behavior, companies and enterprises engaged in the production and sale of appliances are faced with an urgent need to use innovative approaches to attract and retain customers. The article discusses various marketing methods, such as: digital marketing, content marketing, social networks, data analytics and personalization. Particular attention is paid to the use of modern technologies such as artificial intelligence, Internet of Things (IoT) and virtual reality (VR) to create innovative marketing strategies. The article also examines the issues and obstacles that organizations face when introducing new marketing techniques in instrumentation.

Keywords: instrumentation, digital marketing.

*Адрес для переписки: Третьякова Е.С., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by*

Инновационные методы маркетинга имеют огромный потенциал для развития и применения в приборостроении. Они могут помочь компаниям в этой отрасли эффективно привлекать клиентов, сокращать время и затраты средств на маркетинговые исследования, повышать конкурентоспособность на рынке. Однако, внедрение современных методов маркетинга в приборостроении также может столкнуться с определенными преградами.

Одним из самых актуальных методов маркетинга, которые можно упомянуть, является использование «цифрового маркетинга». С учетом стремительного развития технологий и прироста числа пользователей интернета, «цифровой маркетинг» может стать эффективным инструментом для привлечения клиентов и увеличения продаж. Это может включать в себя: создание и оптимизацию веб-страниц, использование социальных медиа для повышения осведомленности целевой аудитории о продукте, а также внедрение цифровой рекламы для достижения, той самой целевой аудитории. Но для наиболее эффективной оптимизации «цифрового маркетинга» необходимы соответствующие навыки и знания.

Другим методом современного маркетинга, который можно внедрить в отрасль приборостроения – это создание уникального опыта у клиента. Этот процесс может включать в себя: как и использование виртуальной реальности или же дополненной реальности для демонстрации продукта или обучения клиентов, так и создание интерактивных презентаций либо демонстраций для повышения вовлеченности клиентов и предоставление специальных предложений и услуг, дабы преумножить удовлетворенных клиентов. Данный подход сыграет на руку компаниям отрасли приборостроения установить долгосрочные и перспективные отношения с клиентами, а также увеличить их лояльность к бренду.

Однако, внедрение инновационных методов маркетинга в приборостроение также сталкивается с некоторыми трудностями. Во-первых, инновационные методы маркетинга могут требовать значительных финансовых и временных инвестиций, что может быть проблематично для компаний с ограниченными ресурсами.

Во-вторых, для успешной реализации инновационных методов маркетинга необходимо

иметь высококвалифицированных специалистов, что также может быть вызовом для компаний.

В заключение, инновационные методы маркетинга имеют большой потенциал для развития и применения в приборостроении. Они могут помочь компаниям привлекать клиентов, сокращать время и затраты на маркетинговые

исследования и повышать конкурентоспособность на рынке. Однако, их внедрение также может столкнуться с определенными трудностями, такими как: необходимость в финансовых и временных инвестициях, а также наличие высококвалифицированных специалистов.

УДК 621.7

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРЕХКООРДИНАТНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ПРОЦЕССЕ РЕВЕРСНОЙ ИНЖЕНЕРИИ И СОЗДАНИЯ ТОЧНЫХ 3D-МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ

Троцкая А.Э., Гомма М.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Использование трехкоординатной измерительной техники помогает контролировать детали в цехах и лабораториях. Тем самым обеспечивая стабильность процесса и контроль качества на всех уровнях – от простых проверок до более глубокого анализа допусков формы и положения.

Ключевые слова: CAD-модели, контроль, визуализация, проектирование.

USE OF THREE-AXIS MEASUREMENT TECHNOLOGY IN REVERSE ENGINEERING PROCESS AND CREATION OF ACCURATE 3D-MODELS OF OBJECTS

Trotskaya A.E., Homma M.A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The use of three-axis measuring technology helps to control parts in workshops and laboratories. This ensures process stability and quality control at all levels - from simple inspections to more in-depth analysis of shape and position tolerances.

Key words: CAD models, control, visualization, design.

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

Обратный инжиниринг – это процесс, в ходе которого выявляются технологические свойства объекта, устройства или системы технологических свойств путем всестороннего анализа его структуры, функций и операций. В машиностроении этот процесс направлен на создание виртуальной 3D-модели на основе существующего физического объекта для его копирования или улучшения.

Обратный инжиниринг может включать в себя:

– выезд конструктора на место для проведения замеров;

– измерение деталей с использованием оптических и контактных координатно-измерительных машин;

– 3D сканирование;

– построение на основе данных, полученных при обмере объемных математических моделей и изготовление прототипа по технологии быстрого прототипирования;

– создание твердотельной 3D модели;

Методы эволюционировали от ручных измерений до использования возможностей, заложенных в технологиях трехмерной измерительной техники.

Процесс обратного инжиниринга используется уже много веков. Вероятно, римляне были

первыми применившими этот метод, о чем рассказал величайший греческий историк своего времени Полибий.

Трехкоординатная измерительная техника новейшего поколения имеет оптические датчики, это обеспечивает высокую точность и стабильность измерений. КИМ могут применяться для контроля прототипов, контроля на основе статистического анализа, быстрых измерений, полного анализа деталей путем сканирования и сравнения с моделями CAD.

Потребность в реверс-инжиниринге возникает в самых различных ситуациях. Например, старые приборы, которые работали долгое время вышли из строя, им необходим ремонт, но выпуск запчастей больше не осуществляется. Реверсивный инжиниринг позволяет сократить время разработки изделий. Он позволяет быстро получить цифровое изображение изделия в трехмерной форме и экспортировать данные для быстрого создания прототипа, оснастки или производства.

Иногда детали дорабатываются в процессе использования, после чего необходимо вносить изменения в CAD-модели. Во многих случаях CAD-модели существуют, но недоступны по различным причинам, связанным с конкуренцией и ком-

мерческой тайной. Важным направлением использования реверс-инжиниринга также являются сравнительные тесты и конкурентный анализ.

Для реинжиниринга объекта необходимо знать его физические размеры. Если размеры не будут предельно точными, то изделие, созданное методом обратного проектирования, не будет точной копией оригинала и может не работать.

Размеры деталей можно тщательно измерить вручную с помощью штангенциркуля, микрометра и других подобных инструментов. В современном реверсивном проектировании координатно-измерительная машина (КИМ) позволяет измерить геометрию объекта быстрее и точнее, чем традиционные ручные инструменты.

Типичная КИМ измеряет по трем ортогональным осям – X , Y и Z , работая в трехмерной системе координат. Каждая ось имеет шкалу, указывающую положение точки на этой оси.

В КИМ используются контактные датчики для регистрации точек при контакте датчика с поверхностью измеряемой детали. Точки измеряются по очереди, пока КИМ не соберет достаточно данных для определения длины, диаметра, угла и других геометрических элементов. Машина считывает данные с контактного датчика по указанию оператора или программного обеспечения. Затем координаты XYZ каждой точки используются для определения размеров и положения.

КИМ может измерять размеры как при контакте с объектом, так и с помощью лазерного сканера. Собранные облако точек преобразуется в поверхности. Эти данные измерений экспортируются в *CAD*-пакет для уточнения, анализа и создания траекторий режущего инструмента.

STL (stereo-lithography) – формат файлов, родной для программного обеспечения *CAD* для стереолитографии, широко используемый в отраслях *3D*-печати и автоматизированного проектирования. Файлы *STL* содержат только геометрию поверхности трехмерного объекта без каких-либо цвета, текстуры и других распространенных атрибутов *CAD*-модели. Они также содержат необработанную неструктурированную триангулированную поверхность с единичными нормальными и вершинами (упорядоченными по правилу правой руки) с использованием трехмерной декартовой системы координат.

Данные сканирования – это, по сути, набор трехмерных точек. Они могут быть преобразованы в сетку путем соединяя соседние точки с помощью треугольников, которые являются простейшей единицей грани. Основное преимущество сетки заключается в том, что это очень наглядный формат, позволяющий хорошо визуализацию формы объекта.

При сканировании визуализация проще с помощью облака точек. Облака точек могут содер-

жать больше информации, поскольку для эквивалентных данных файлы получаются более легкими. Визуализация не так велика, как в случае с сеткой, но может быть выполнена для больших объектов. Для создания *STL*-файла потребовалось бы очень много времени для создания, без гарантии качества.

Лазерный линейный сканер может быть прикреплен к измерительной руке для проведения бесконтактных измерений. Лазерный сканер может быстро снимать данные для создания облака точек, состоящего из миллионов точек данных, которые могут быть использованы для создания файла *CAD*.

Для определения положения объектов в трехмерном пространстве используется процесс триангуляции. На измеряемую поверхность проецируется лазерная полоса, излучаемая диодом. Камера смотрит на лазерную полосу под известным углом и определяет местоположение каждой точки на линии. Высокая частота кадров и высокое разрешение датчиков изображения повышают скорость сканирования и позволяют получать облака точек высокой плотности, способные распознавать более мелкие детали.

Преимущества добавления лазерного сканирующего датчика к измерительному манипулятору заключаются не только в скорости сбора большого количества данных, но и в простоте использования и снижении риска задеть деталь во время измерения.

Развивающейся тенденцией является использование искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения при реинжиниринге. Эти технологии способны автоматизировать отдельные части процесса проектирования, что приведет к повышению эффективности и точности.

Несомненно, у реверсивного инжиниринга большое будущее. Рабочие процессы реверсивного инжиниринга будут становиться все более эффективными и сложными по мере того, как технологические инновации будут влиять как на измерительные приборы, так и на специализированное программное обеспечение.

Литература

1. Бутакова, Е.Р. Проектирование в машиностроении с помощью обратного инжиниринга / Е.Р. Бутакова // Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация: Материалы международной научно-практической конференции. – СПб. : НИЦ МС, 2019. – № 2. – С. 14–16.
2. Владимиров, Д.А. Обратный инжиниринг как основной инструмент в повышении эффективности проведения НИОКР / Д.А. Владимиров // Наука и бизнес: пути развития. – 2020. – № 9(111). – С. 28–30.
3. Сахаров, В.А. Обратный инженеринг: подходы, преимущества и применение / В.А. Сахаров, М.В. Лапский // Информационные науки и технологии. – 2021. – Т. 11, № 1. – С. 53–59.

4. Чернов, Р.С., Применение методов реверс-инжиниринга для решения производственных задач в современных реалиях / Р.С. Чернов, К.А. Мишкина,

Ю.О. Стреляная // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2022. – № 10. – С. 48–51.

УДК 618

АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫХ К ЭЛЕКТРОННЫМ СИСТЕМАМ ДОСТАВКИ НИКОТИНА И НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ТАБАКА В ХОДЕ КОНТРОЛЬНОЙ (НАДЗОРНОЙ) ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Давыдова Е.А., Фильченко Н.Т.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы обеспечения качества и безопасности электронных систем доставки никотина (ЭСДН), нагревательного табака, роль надзорных органов в пресечении распространения некачественной никотинсодержащей продукции на территории Республики Беларусь. Предложены методы совершенствования контрольной (надзорной) деятельности за ЭСДН и нагревательного табака.

Ключевые слова: качество и безопасность, электронные системы доставки никотина, нагревательный табак, надзорные органы.

ANALYSIS OF THE REQUIREMENTS FOR ELECTRONIC DELIVERY SYSTEMS OF NICOTINE AND HEATING TOBACCO DURING CONTROL (SUPERVISION) ACTIVITIES

Davydova E.A., Filchanko N.T.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The article discusses issues of ensuring the quality and safety of electronic nicotine delivery systems (ENDS), heating tobacco, the role of supervisory authorities in suppressing the spread of low-quality nicotine-containing products in the territory of the Republic of Belarus. Methods for improving control (supervisory) activities for ENDS and heated tobacco are proposed.

Key words: quality and safety, electronic nicotine delivery systems, heating tobacco, regulatory authorities.

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

В современном обществе все чаще встречаем людей, выдыхающих большие клубы пара из специального устройства. Это новое течение среди молодежи, которые считают, что парение достойная альтернатива сигаретам. Изготовители и продавцы утверждают, что дым безопасен, а вкусовой состав не вызывает привыкание.

Но все чаще в разных источниках появляется информация о том, что вред курения электронных сигарет соизмерим с курением обычных.

В состав жидкостей для ЭСДН входит пропиленгликоль и глицерин, при нагревании распадающиеся с образованием акролеина и формальдегида, которые обладают токсичными свойствами; природный никотин заменен химическим; ароматизаторы, которые имеют накопительный эффект, приводят к заболеваниям дыхательных путей.

В 2021 году состоялся доклад Всемирной организации здравоохранения о глобальной табачной эпидемии «Решение проблемы новых и появляющихся изделий». Это уже восьмой в серии докладов ВОЗ, который отслеживает состояние табачной эпидемии и меры по борьбе с ней. В докладе говорится, что до тех пор, пока независимые исследования не покажут реальный профиль

риска электронных систем доставки никотина, правительствам следует проявлять осторожность. Их действия должны основываться на научную обоснованность данных, а не на маркетинге. 111 стран тем или иным образом регулируют ЭСДН: 32 из этих стран запрещают продажу ЭСДН, а остальные 79 стран приняли законодательные меры для регулирования ЭСДН [1].

На сегодняшний день на территории стран Евразийского экономического союза действует технический регламент ТР ТС 035/2014 «Технический регламент на табачную продукцию», объектом которого являются сигареты, сигары и сигариллы, а также различные виды табака и другая подобная продукция. Вейпы, электронные сигареты и нагревательный табак – совершенно иной продукт, действие данного регламента на него не распространяется. Потребителям предлагается продукция с неограниченным содержанием никотина, отсутствием информации о вреде ее употребления, что является реальной угрозой жизни и здоровью человека.

В связи с этим страны ЕАЭС вводят ограничения самостоятельно, что нередко приводит к разногласиям.

Для регулирования никотинсодержащей продукции Российской Федерацией принят ряд документов:

– разработан ГОСТ Р 58109-2018 «Жидкости для электронных систем доставки никотина. Общие технические условия», который устанавливает требования к ЭСДН;

– в июле 2020 года принят Федеральный закон от 23.02.2013 N 15-ФЗ (редакция от 24.07.2023) «Об охране здоровья граждан от воздействия окружающего табачного дыма, последствий потребления табака или потребления никотинсодержащей продукции», согласно которому на жидкости для вейпов, кальяны или стики для систем нагревания табака стали распространяться запреты, аналогичные ограничениям на курение и продажу табачных изделий [2].

В Республике Беларусь в Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 21 октября 2016 г. № 849 «О некоторых вопросах подтверждения соответствия в Национальной системе подтверждения соответствия Республики Беларусь» от 6 января 2022 г. были внесены изменения № 8 «Об изменении постановления Совета Министров Республики Беларусь от 21 октября 2016 г. № 849». Теперь с 01 апреля 2022 нетабачные никотинсодержащие изделия орального способа потребления, никотинсодержащие жидкости для электронных систем курения и электронные системы курения с жидкостями для них, конструктивно входящими в состав таких систем подлежат обязательной сертификации [3].

Белорусским государственным институтом стандартизации и сертификации и Белорусским государственным институтом метрологии (БелГИМ) разработан СТБ 2601-2022 «Изделия никотинсодержащие нетабачные орального потребления. Общие технические условия», который устанавливает требования к нетабачным никотинсодержащим изделиям орального потребления, в том числе к сырью и материалам, упаковке и маркировке.

БелГИМ и Гродненский центр стандартизации, метрологии и сертификации аккредитованы на проведения испытаний и работ по подтверждению соответствия нетабачных никотинсодержащих изделий.

Надзорными органами проводятся мониторинги по соблюдению требований Постановления № 849, предъявляемых к ЭСДН, направление рекомендаций по устранению и недопущению недостатков, выявленных в результате мониторинга. Принимаются меры по недопущению к ввозу и реализации несоответствующей продукции: контролируемому субъекту выносятся запреты реализации продукции, не соответствующей требованиям

данного Постановления, при повторных контрольных (надзорных) мероприятиях в отношении субъекта и (или) его должностных лиц применяются меры ответственности [4].

Но поскольку отсутствуют разработанные технические регламенты на никотинсодержащие жидкости и системы нагревания табака, возникает ряд вопросов в части требований, предъявляемых к данным продуктам. Так, согласно пункта 1 статьи 2 ТР ТС 035/2014 к табачным изделиям относят сигареты, сигары, сигариллы (сигариты), папиросы, табак для кальяна, табак курительный тонкорезанный, табак трубочный, биди, крестек, табак сосательный (снюс), табак жевательный, табак нюхательный, насвай [5]. Под курением понимается вдыхание дыма, возникающего от их тления.

Исходя из вышесказанного, системы нагревания табака (СНТ) не регламентируются, в соответствии с Постановлением № 849 СНТ не отнесены ни к одной из групп никотинсодержащих изделий и на сегодняшний день осуществить контрольные мероприятия не представляется возможным. Для сертификации никотинсодержащих изделий и подтверждения соответствия требованиям законодательства аккредитованными лабораториями Республики Беларусь проводятся испытания по определению массовой доли никотина и верификации информации о количестве никотина, указанного в маркировке, однако в составе таких изделий входят и иные компоненты, которые могут оказывать вред жизни и здоровью человека.

Закключение: в докладе будут представлены рекомендации для использования в работе государственных органов по усовершенствованию контрольной (надзорной) деятельности в отношении никотинсодержащих изделий и систем нагревания табака.

Литература

1. Доклад ВОЗ о глобальной табачной эпидемии «Решение проблемы новых и появляющихся изделий». – 2021 – 19 с.
2. Об охране здоровья граждан от воздействия окружающего табачного дыма, последствий потребления табака или потребления никотинсодержащей продукции: Федеральный закон от 23.02.2013 N 15-ФЗ. – Редакция от 24.07.2023. – С. 11.
3. Об изменении постановления Совета Министров Республики Беларусь от 21 октября 2016 г. № 849 : Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 06.01.2022 № 8.
4. Указ Президента Республики Беларусь от 16 октября 2009 г № 510 «О совершенствовании контрольной (надзорной) деятельности в Республике Беларусь». – 52 с.
5. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 035/2014 «Технический регламент на табачную продукцию». Принят решением Совета Евразийской экономической комиссии от 12 ноября 2014 года № 107.

УДК 618

**АКТУАЛЬНОСТЬ НАУЧНОГО РАЗВИТИЯ КОНЦЕПЦИИ
«БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА» В РАМКАХ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА
НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

Фурс М.С., Серенков П.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В данной статье описана необходимость внедрения концепции «бережливого производства» в рамках действующей системы менеджмента качества с целью повышения конкурентоспособности промышленных предприятий. Освещена основная проблема внедрения концепции «бережливого производства». **Ключевые слова:** конкурентоспособность, эффективность, концепция, бережливое производство.

**THE RELEVANCE OF THE SCIENTIFIC DEVELOPMENT OF THE CONCEPT
OF "LEAN MANUFACTURING" WITHIN THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM
AT INDUSTRIAL ENTERPRISES**

Furs M., Serenkov P.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. This article describes the need to introduce the concept of "lean manufacturing" within the framework of the current quality management system in order to increase the competitiveness of industrial enterprises. The main problem of implementing the concept of "lean production" is highlighted.

Key words: competitiveness, efficiency, concept, lean manufacturing.

*Адрес для переписки: Фурс М.С., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: mariya.sergeevna.furs@gmail.com*

Достижение конкурентоспособности – стратегическая цель каждого промышленного предприятия. Мировой опыт показывает, что именно в условиях открытой рыночной экономики, немислимой без острой конкуренции, проявляются факторы, которые делают качество и стоимость продукции условием конкурентоспособности предприятий и, следовательно, условием их выживаемости.

Повышение качества является одной из основных задач развития экономики Республики Беларусь. Вопросы повышения качества включены в основные программы развития:

1) программа социально-экономического развития РБ на 2021–2025 годы, утверждена Указом Президента Республики Беларусь от 29 июля 2021 года № 292;

2) программа деятельности Правительства РБ на период до 2025, утверждена постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 24 декабря 2020 года № 758;

3) государственная программа инновационного развития РБ на 2021–2025 годы, утвержденная Указом Президента Республики Беларусь от 15 сентября 2021 года № 348;

4) программа «Качество 2021–2025», утверждена Премьер-министром Республики Беларусь 08.12.2020 года.

Однако, как отметил в своем выступлении Министр экономики А. Червяков, выступая на семинаре «О реализации комплекса мер по повышению производительности труда», организованном

Минэкономразвития РФ на площадке Центра повышения производительности ВАВТ 16.02.2023 года, текущие вызовы экономики – это не только ограничения, но и новые возможности для развития и повышения конкурентоспособности, как самих предприятий, так и выпускаемой ими продукции. Одна из ключевых задач здесь – рост производительности труда.

А. Червяков особо отметил, в стране сегодня недостаточно задействован потенциал общефакторной производительности в части организации бережливого производства и выстраивания бизнес-процессов.

Иными словами, два элемента – качество и стоимость продукции – являются главными составляющими конкурентоспособности предприятия.

В соответствии с СТБ ISO 9000-2015 Система менеджмента качества (далее – СМК) – часть системы менеджмента, нацеленная на качество созданная для разработки политики, целей и также процессов, обеспечивающих их достижение. Внешняя среда организаций постоянно изменяется, поэтому для обеспечения качества своих услуг организации должны регулярно анализировать требования потребителей, определять процессы, способствующие созданию продукции, удовлетворяющей потребности потребителей, а также поддерживать эти процессы в управляемом состоянии.

В соответствии с ГОСТ Р 56020-2014 «Бережливое производство» (далее – БП) – это концепция организации бизнеса, ориентированная на создание привлекательной ценности для потребителя.

Философия БП основана на представлении бизнеса как потока создания ценности для потребителя, гибкости, выявлении и сокращении потерь, постоянном улучшении всех видов деятельности на всех уровнях организации, вовлечении и развитии персонала с целью повышения удовлетворенности

Философия БП предполагает высокий уровень самоорганизации, менеджмент, опирающийся на корпоративную культуру, что придает большое значение ценностям, которые организация определяет, поддерживает и развивает. Ценности БП представлены как организационная основа концепции, на которую опираются принципы БП.

Иными словами, если в СМК сделан акцент на качестве, то в БП – на поиске и устранении потерь. Первая система ориентирована на результативность, вторая – на эффективность. Концепцию БП нужно рассматривать не как дополнение СМК, а как следующую стадию ее развития.

В настоящее время БП используется организациями во многих странах и в разных отраслях. В 2017 г. Министерство промышленности и торговли РФ утвердило «Рекомендации по применению принципов бережливого производства в различных областях промышленности». С 2014 по 2019 г. в РФ разработаны и введены в действие 14 государственных стандартов по бережливому производству. В РБ аналогичные ТНПА отсутствуют.

Хотя в Республике Беларусь есть много промышленных предприятий внедривших инструменты или концепцию БП в целом (ОАО «Белкоммунмаш», ОАО «МТЗ», Европейская станкоинжиниринговая компания, «Радиоволна» и др.), внедрение БП на белорусских предприятиях часто представляет собой бессистемный, случайный и финансово затратный процесс, ввиду отсутствия теоретической и методологической базы внедрения концепции БП. Существующие рекомендации по внедрению концепции БП базируются в основном на практическом опыте организаций Беларуси, России и стран ближнего и дальнего зарубежья по внедрению отдельных методов и инструментов БП. Что в свою очередь представляет концепцию БП не как комплексную системоуправляющую организацию, с акцентом на последовательную глубокую реализацию, определение ценности для потребителя, описание состояния потока создания ценности как есть, разработки программы по сокращению всех видов потерь и повышению эффективности процессов, системному подходу к сокращению производственных потерь всех бизнес-процессов, а как всего лишь инструментарий, помогающий устранить отдельные виды потерь. Предприятия Республики Беларусь накопили достаточный опыт применения отдельных методов и инструментов БП. Причиной этому является отсутствие

методологии практического внедрения БП, использование организациями переводных материалов, введение собственных определений и неточная интерпретация терминов. Например, когда организация определяет границы СМК и БП в общей системе менеджмента организации. Это значит, что две системы менеджмента изначально разделяются, а не объединяются для развития бизнес-процессов организации.

Многие промышленные предприятия, имеющие внедренную сертифицированную СМК работают с отрицательной рентабельностью. Таким предприятиям жизненно важно найти рычаги для снижения себестоимости продукции.

В данном докладе будет приведен алгоритм внедрения концепции БП на базе действующей СМК, состоящий из следующих этапов:

1. Разработка и внедрение функциональной модели сети процессов СМК: построение функциональной модели сети процессов СМК в состоянии «как есть»; анализ модели на соответствие требованиям СТБ ISO 9001-2015, анализ модели на соответствие организационной структуре, осуществление поиска причин недостижения целей через менеджмент рисков, построение модели сети процессов СМК в состоянии «как надо», установление критериев результативности СМК на основе технико-экономических показателей организации.

2. Разработка типового алгоритма поиска потерь, их источников потерь разных категорий процессов СМК. Определение вида и стоимости потерь в разрезе общезаводский расходов.

3. Выбор и обоснование инструментов концепции БП приемлемых для каждого процесса СМК. Разработка методик внедрения инструментов БП для каждого процесса СМК.

Данный алгоритм внедрения концепции БП на базе действующей СМК обеспечит промышленным предприятиям переход на более высокий уровень управления организацией, что позволит сократить расходы на всех этапах производства, повысить скорость производственных процессов, улучшить качество выпускаемой продукции.

Литература

1. Промышленность стран мира [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://visasam.ru/emigration/economy/promyshlennost-stran-mira.html>.
2. Бакшеев, С.Л. Теоретические аспекты бережливого производства / С.Л. Бакшеев // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. – 2019. – С. 227–230.
3. Бережливое производство: учебное пособие. – СПб : Питер, 2023. – 224 с.
4. Серенков, П.С. Методы менеджмента качества. методология организационного проектирования инженерной составляющей системы менеджмента качества / П.С. Серенков. – Минск: Новое зрение; ИНФРА-М, 2011. – 491 с.

УДК 621.382

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ НА ПАРАМЕТРЫ ДИОДОВ ГЕНЕРАТОРОВ ШУМА

Буслюк В.В.^{1,2}, Дереченник С.С.¹, Оджаев В.Б.³, Просолович В.С.³, Ластовский С.Б.⁴,
Нерода И.Ю.², Федосюк Д.Н.², Черный В.В.⁵, Янковский Ю.Н.³

¹УО «Брестский государственный технический университет»

²ОАО «Цветотрон»

Брест, Республика Беларусь

³Белорусский государственный университет

⁴НПЦ по материаловедению НАНБ

⁵УО «Белорусский национальный технический университет»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследованы изменения электрофизических параметров кремниевых диодов-генераторов шума ND103L, при облучении быстрыми электронами с энергией 5 МэВ дозами $3 \cdot 10^{13}$ – $1 \cdot 10^{15}$ см⁻². Установлено, что величины обратных токов при всех значениях обратного напряжения существенно возрастают в процессе облучения. Эффективное напряжение шума и спектральная плотность напряжения шума в процессе облучения возрастают до доз $5 \cdot 10^{13}$ и $3 \cdot 10^{13}$ см⁻², соответственно. При дальнейшем увеличении потока электронов оба параметра уменьшаются. Облучение приводит также к значительному росту граничной частоты шумового сигнала и падению спектральной плотности напряжения шума в этой полосе частот. Результаты объясняются модификацией микроплазм радиационными дефектами.

Ключевые слова: диоды генераторы шума, быстрые электроны, электрофизические параметры, микроплазмы.

EFFECT OF FAST ELECTRON IRRADIATION ON THE PARAMETERS OF NOISE GENERATOR DIODES

Buslyuk V.V.^{1,2}, Derechennik S.S.¹, Odzaev V.B.³, Prosolovich V.S.³, Lastovski S.B.⁴,
Neroda I.Yu.², Fedosuyk D.N.², Chernyi V.V.⁵, Yankouski Yu.N.³

¹National Technical University of Brest

²JSC "Tsvetotron"

Brest, Republic of Belarus

³Belarusian State University

⁴Scientific-Practical Materials Research Centre, NAS of Belarus

⁵Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Changes in the electrophysical parameters of ND103L silicon noise generator diodes have been studied when irradiated with fast electrons with an energy of 5 MeV doses $3 \cdot 10^{13}$ – $1 \cdot 10^{15}$ cm⁻². It is established that the values of reverse currents at all values of reverse voltage increase significantly in the irradiation process. The effective noise voltage and the spectral density of the noise voltage during irradiation increase to doses of $5 \cdot 10^{13}$ and $3 \cdot 10^{13}$ cm⁻², respectively. With a further increase in the electron flow, both parameters decrease. Irradiation also leads to a significant increase in the boundary frequency of the noise signal and a drop in the spectral density of the noise voltage in this frequency band. The results are explained by the modification of microplasmas by radiation defects.

Key words: diodes noise generators, fast electrons, electrophysical parameters, microplasmas.

Адрес для переписки: Просолович В.С., пр. Независимости, 4, г. Минск, 220050, Республика Беларусь
e-mail: prosolovich@bsu.by

В качестве источников шума используются полупроводниковые диоды, генерирующие широкополосный шум с высокой спектральной плотностью в режиме обратного смещения. Причинами шума являются микроплазменные образования в области пространственного заряда (ОПЗ) диодов, зависящие от неоднородностей структуры, дефектов [1]. Ранее было показано, что подбором соответствующих режимов отжига диодов и среды его проведения может быть обеспечена стабилизация остаточных точечных дефектов на финишных этапах изготовления приборов и оптимизация их эксплуатационных

характеристик [2]. Модификация дефектно-примесного ансамбля полупроводниковых структур может быть достигнута также при высокоэнергетических внешних воздействиях. С этой целью было исследовано изменение электрофизических параметров диодов генераторов шума при облучении электронами с энергией 5 МэВ.

Диоды генераторы шума ND103L изготавливались по планарной диффузионной технологии на основе монокристаллического кремния *p*-типа, $\rho = 0,03$ Ом·см, ориентацией (111). Глубина *p-n*-перехода, сформированного диффузией, фосфора составляла ~ 6 мкм. Измерения вольт-амперных и

вольтфарадных характеристик (ВАХ и ВФХ) производились с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов *Agilent B1500A* и зондовой станции *Cascade Summit11000* в интервале температур -60 – 125 °С. Облучение электронами с энергией 5 МэВ выполнялось дозами (Φ) $3 \cdot 10^{13}$ – $1 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$. Измерения шумовых характеристик осуществлялись на автоматизированном комплексе измерения электрических параметров шумовых диодов АКЖД.

Установлено, что зависимость емкости от приложенного обратного смещения имеет вид $1/C^3 \sim U_{обр}$ и характерна для плавного p - n -перехода [3]. Измерения ВАХ при показали, что для всех диодов обратные ветви имеют активационный характер. При построении их в двойном логарифмическом масштабе имеет место наличие двух областей (рисунок 1).

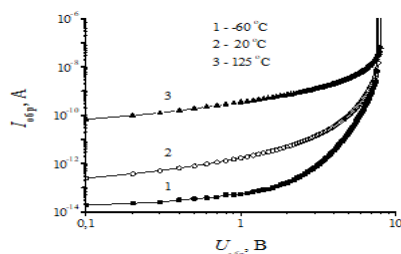


Рисунок 1 – Типичные обратные ВАХ p - n -переходов при различных температурах измерений

При $U < 2$ В ток практически не зависит от напряжения, что свидетельствует о преобладании в данной области диффузионного тока. При $U > 2$ В наблюдается степенная зависимость тока от напряжения $I_{обр} \sim U^n$ [3] с $n > 1$, что свидетельствует о высокой концентрации рекомбинационно-генерационных центров и их неоднородном распределении.

Таблица 1. Изменение величин обратных токов диодов при различных обратных напряжениях ($U_{обр}$) после облучения быстрыми электронами

$\Phi \cdot 10^{13}$, см $^{-2}$	0	3	5	10	50	100
$I_{обр} = 10^{11}$, А ($U_{обр} = 4$ В)	0,89	1,76	1,88	2,57	5,73	7,65
$I_{обр} = 10^{11}$, А ($U_{обр} = 5$ В)	1,48	3,14	3,28	4,80	13,3	18,9
$I_{обр} = 10^{11}$, А ($U_{обр} = 6$ В)	2,60	6,21	7,15	1,1	33,4	49,7
$I_{обр} = 10^{11}$, А ($U_{обр} = 8$ В)	11,6	33,0	43,1	59,2	237	366
$U_{пр}$, В	8,99	8,63	8,62	8,64	8,63	8,61

После облучения электронами ВФХ исследуемых приборов практически не изменялись, т. е. размеры области пространственного заряда вблизи металлургической границы p - n -перехода существенно не изменялись. Однако, величины обратных токов при всех значениях обратного напряжения существенно возрастали в процессе облучения (таблица 1).

Это связано с образованием при облучении радиационных дефектов, являющихся глубокими генерационно-рекомбинационными центрами, что и обуславливает увеличение обратного тока. Происходит также закономерное снижение величины напряжения пробоя ($U_{пр}$). Изменение шумовых характеристик диодов приведено в таблице 2, где $U_{эфф}$ – эффективное напряжения шума S_U – спектральная плотность напряжения шума (СПНШ), δS_U – неравномерность СПНШ при токе 50 мкА, $f_{гр}$ – граничная частота шумового сигнала при токе 50 мкА. Из таблицы 2 видно, что эффективное напряжения шума и спектральная плотность напряжения шума в процессе облучения возрастают до доз $5 \cdot 10^{13}$ и $3 \cdot 10^{13}$ см $^{-2}$, соответственно. При дальнейшем увеличении потока электронов оба параметра уменьшаются.

Таблица 2. Изменение шумовых характеристик диодов после облучения быстрыми электронами

$\Phi \cdot 10^{13}$, см $^{-2}$	0	3	5	10	50	100
$U_{эфф}$, мВ	227	331	379	325	178	148
S_U , мкВ·Гц $^{-1/2}$	121	181	151	144	60	45
δS_U , дБ	1,59	1,61	1,65	1,67	1,73	1,73
$f_{гр}$, МГц	4,1	5,2	6,0	6,2	11,2	13,3

Микроплазменные образования в области пространственного заряда p - n -перехода, расположенные на неоднородностях структуры и различного вида дефектах являются основными причинами возникновения шума. Генерируемые при облучении быстрыми электронами радиационные дефекты могут коагулировать на микроплазмах, увеличивая неоднородность потенциального рельефа, что приводит к расширению области шумовых частот, увеличению $U_{эфф}$ и S_U на начальных дозах облучения. При дальнейшем росте дозы концентрация радиационных дефектов, формирующих глубокие уровни в запрещенной зоне, возрастает, что приводит к уменьшению времени жизни неравновесных носителей заряда вследствие увеличения вероятности их рекомбинации на глубоких уровнях. Это обуславливает с одной стороны увеличение обратного тока диодов, а с другой стороны уменьшение эффективного напряжения шума и спектральной плотности напряжения шума.

Литература

- Physical Parameters of the Broadband Noise-Generator Diodes / V.V. Buslyuk [et al.] // Russian Microelectronics. – 2020. – Vol. 49, № 4. – P. 295–301.
- Стабилизация шумовых параметров при отжиге высоколегированных структур диодов-генераторов шума / В.В. Буслюк [и др.] // Доклады БГУИР. – 2021. – Т. 19, № 6. – С. 32–41.
- Sze, S.M. Semiconductor Devices: Physics and Technology / S.M. Sze, M.K. Lee. – John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited, 2012. – 582 p.

UDC 535.08

BLUE LIGHT HAZARD MEASUREMENT AND UNCERTAINTY ANALYSIS OF SMARTPHONES**Zhang Y., Saukova Y.N.***Belarusian National Technical University**Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Based on the conclusion obtained from the questionnaire survey: Smartphones are currently the electronic device that has been used the longest and most frequently. The blue light harm that smart phones may cause to the retina was measured. Uncertainty analysis of photobiosafety measurements of smartphones and measurement recommendations are given.

Keywords: smartphones, blue light hazards, measurement uncertainty.

ИЗМЕРЕНИЕ ОПАСНОСТИ СИНЕГО СВЕТА И АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ СМАРТФОНОВ**Чжан Ю., Савкова Е.Н.***Белорусский национальный технический университет**Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. На основании вывода, полученного в результате анкетирования: Смартфоны в настоящее время являются электронным устройством, которое используется дольше и чаще всего. Был измерен вред синего света, который смартфоны могут нанести сетчатке. Дан анализ неопределенности измерений фотобиобезопасности смартфонов и рекомендации по измерениям.

Ключевые слова: смартфоны, опасность синего света, погрешность измерений.

Address for correspondence: Savkova E.N., 65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220113, Republic of Belarus

e-mail: zhang_yun1991@foxmail.com

Electronic display devices (electronic watches, smart phones, computers, TVs, screens, etc.) have become a part of human social life, which will affect people's physiology and psychology while transmitting information. As a collection of light radiation sources and information sources, electronic display devices are very different from ordinary light sources (lamps, LEDs, natural light, etc.): 1) look directly to obtain information; 2) invest different attention depending on the content of the information; 3) applied to various scenarios (indoor, outdoor, transportation, etc.). People interact with electronic display devices for a long time, so it is very important to further systematically study the effects of electronic display devices on human body.

As the preliminaries of this article, the author conducts a questionnaire survey on people of all ages from various countries, and draws the main conclusions: 1. Mobile phones are the electronic devices that have been used the longest and most frequently, followed by computers (mainly used for work); 2. People prefer to work in a bright light environment and prefer dynamic content; 3. Long-term use of mobile phones and computers may cause visual and mental fatigue and insomnia [1]. Therefore, this article takes smartphones as the research object to analyze the retinal blue light hazards that may be caused by long-term use of this device.

Blue light hazard refers to the photochemical effect caused by human eyes being exposed to blue light, which can cause retinal damage. The spectral radiance of different wavelengths emitted by the mobile phone screen is multiplied by the blue light

hazard weighting function, and the wavelength is integrated to obtain the blue light weighted radiance. In order to prevent photochemical damage to the retina caused by long-term exposure to blue light, the spectral brightness energy of the light source and the weighted blue hazard function $B(\lambda)$, that is, the weighted brightness L_B of blue light should not exceed $10^6 \text{ J} / (\text{m}^2 \text{ sr})$ ($t \leq 10^4 \text{ s}$) or $100 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{ sr})$ ($t > 10^4 \text{ s}$), the formula is expressed as [2]:

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

$$L_B = \sum_{300}^{700} L_\lambda B(\lambda) \Delta\lambda \leq 100 \quad (t > 10^4 \text{ s}) \quad (2)$$

where: $L_\lambda(\lambda, t)$ is the spectral radiance, the unit is $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$; $B(\lambda)$ is the blue light hazard weighting function (the blue light hazard weighting curve $B(\lambda)$ adopts the data given in GB/T 20145-2006 [3], and its peak wavelength is at 437 nm); $\Delta\lambda$ is the wavelength (nm), t is the radiation duration, (s).

Use the goniophotometer SMS 10c (SMS10C10090111 Calibration Certificate BY 01 № 0027203-5022 of 07/22/2022. Calibration Certificate BY 01 № 0017668-4122 of 07/16/2022) to test the luminous intensity and spectral distribution of smartphone screen in 8 colors, respectively, and the spectral distribution test results are shown in Figure.

Calculate the radiance $L_\lambda(\lambda, t)$ measured in the experiment through the above formula to obtain the final retinal blue light harmful effective radiance L_B .

The sources of measurement uncertainty for this test mainly include:

1. The uncertainty u_A caused by the measurement repeatability of the smartphone being tested.

2. The measurement uncertainty u_{B1} caused by the calibration uncertainty of the standard light source.

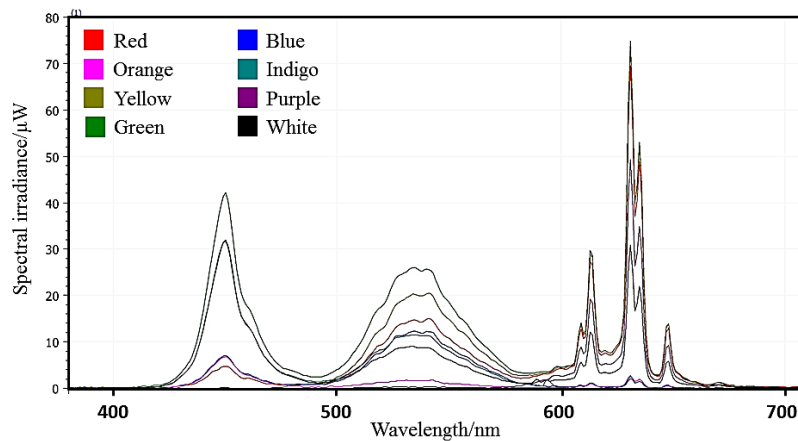
3. Measurement uncertainty u_{B2} caused by the uncertainty of the spectroradiometer.

4. Uncertainty u_{B3} caused by the placement position of the tested mobile phone.

5. Uncertainty u_{B4} caused by environmental conditions.

In this experiment, a spectroradiometer was used to measure and evaluate the retinal blue light hazard of smartphones. It can be seen from the evaluation results that the uncertainty of the standard lamp and the uncertainty of the spectroradiometer have a

greater impact on the measurement uncertainty. Therefore, a high-precision spectroradiometer should be selected as much as possible when measuring, and the standard lamp should be measured regularly to ensure the stability of the standard lamp. Other factors causing uncertainty should also be minimized. The temperature, humidity and airflow of the darkroom should be controlled strictly in accordance with the parameters specified in the standards. Currently, laboratories generally use air conditioners for control. Special attention should be paid to reducing the airflow generated by the air conditioner and reducing its impact on the measurement results.



References

1. Чжан, Ю. Субъективные аспекты восприятия цифровых изображений / Ю. Чжан // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 3 (56).
 2. Photobiological safety of lamps and lamp systems [J] : IEC 62471. – 2006.

3. 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* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.

УДК 528.021

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА ОТРАЖЕННОГО ЛУЧА

Козаченков С.А., Соколов Д.А.

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,

р.п. Менделеево, г. Солнечногорск, Московская обл., Российская Федерация

Аннотация. В работе приведены результаты исследования системы автоматического поиска отраженного луча перспективного метрологического комплекса измерения длины. Исследования проводились до 65 м в лабораторных условиях и до 607 м в полевых условиях. Система показала свою работоспособность, а также способность к упрощению процедуры настройки и уменьшению времени от начала развертывания комплекса до момента первого измерения. Внедрение и использование данной системы позволяет производить измерения длины в полевых условиях в светлое время суток в солнечную погоду.

Ключевые слова: эталон, средство измерения длины, метрологический комплекс.

THE RESULTS OF THE STUDY OF A PROMISING METROLOGICAL LENGTH MEASUREMENT COMPLEX USING AN AUTOMATIC SEARCH SYSTEM FOR THE REFLECTED BEAM

Kozachenkov S.A., Sokolov D.A.

*Russian metrological institute of physico-technical and radio-technical measurements,
Mendeleevo, Solnechnogorsk, Moscow region, Russian Federation*

Abstract. The paper presents the results of a study of an automatic search system for a reflected beam of a promising metrological length measurement complex. The studies were carried out up to 65 m in the laboratory and up to 600 m in the field. The system has shown its operability, as well as the ability to simplify the setup procedure and reduce the time from the start of the complex deployment to the moment of the first measurement. The introduction and use of this system makes it possible to measure length in the field during daylight hours in sunny weather.

Key words: a standard, a means of measuring length, a metrological complex.

Адрес для переписки: Козаченков С.А., Соколов Д.А., р.п. Менделеево, г. Солнечногорск, Московская обл., 141570, Российская Федерация

e-mail: ksa@vniiftri.ru, socolov@vniiftri.ru

В средствах измерительной техники таких как тахеометры электронные [3] и координатно-измерительные машины (лазерные трекеры) применяются системы автоматической настройки на отражатель (ретрорефлектор). Это позволяет существенно ускорить и упростить процесс измерения расстояния до объекта, определить его координаты как в закрытых помещениях (лаборатория, цех и т. д.) так и в полевых условиях в дневное время, когда невозможен визуальный контроль излучения.

Для отработки технических задач был использован макет перспективного метрологического комплекса измерения длины на основе фемтосекундного лазера (МКИДФЛ), который является прототипом эталонного высокоточного метрологического комплекса средств измерений длины в диапазоне от 1,5 до 1000 м, создание которого необходимо в целях обеспечения единства измерений при передаче единицы длины рабочим эталонам и средствам измерения длины методом прямых измерений в полевых условиях. [3], обеспечивая независимое воспроизведение, хранение и передачу единицы длины в соответствующем диапазоне.

С целью оптимизации измерения длин с применением (МКИДФЛ) [1; 4; 5] специалистами ФГУП «ВНИИФТРИ» была разработана система автоматического поиска отраженного луча (САПОЛ) (далее – система).

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Определение состава системы.
2. Оценка требований к приемной и управляющей аппаратуре системы.
3. Проверка работоспособности системы в лабораторных условиях до 65 м и в полевых до 607 м.
4. Оценка характеристик входных сигналов системы на исследуемых дистанциях.

Состав системы:

- узел приема, обработки и формирования TTL сигнала для контроллеров двигателей (разработка ФГУП «ВНИИФТРИ»);
- двигатели вертикальной и горизонтальной оси с контроллерами.

В результате расчета мощности выходящего лазерного излучения из оптической системы на измерительную линию 1000 м в ясную погоду с использованием паспортных данных оптических элементов и экспериментальных измерений их

коэффициентов отражений и пропусканий была оценена мощность лазерного излучения на выходе из оптической системы на измерительную линию – 3 мВт и мощность лазерного излучения на входе в оптическую систему с измерительной линией – 0,02 мВт.

Полученные результаты подтверждают возможность применения разрабатываемой оптической системы в исследуемом диапазоне длин.

Проведена серия измерений по оценке работоспособности системы на дистанции до 65 м в лабораторных условиях – система успешно произвела настройку на отражатель (ретрорефлектор).

Проведена серия измерений по оценке работоспособности системы на дистанции до 607 м в полевых условиях в солнечный летний – система успешно произвела настройку на отражатель (ретрорефлектор).

В результате предварительных испытаний САПОЛ до 607 м отработала штатно, однако потребовалось вмешательство оператора для точной подстройки системы в ручном режиме.

Для макета эталонного дальномера на основе фемтосекундного лазера в диапазоне длин 2,5 м до 1000 м была предложена и реализована система автоматического поиска отраженного луча, которая показала свою работоспособность на дистанции до 607 м, однако при увеличении измерительной дистанции потребуются дополнительные исследования и доработки системы. Использование САПОЛ позволяет существенно упростить и снизить время

подготовки и настройки макета МКИДФЛ к проведению измерений приблизительно с трех часов до 30 минут. Данная система в дальнейшем позволит применять метрологический комплекс измерения длины на основе фемтосекундного лазера в области координатных измерений.

Литература

1. Sokolov, D.A. The reference range finder based on the femtosecond laser for the length measurement in the range up to 60 m. / D.A. Sokolov // Design and application, proceedings of VII International Competition of COOMET «Best Young Metrologist». – 2017.
2. Leica MS60/TS60 Руководство пользователя. – С. 88 – 95.
3. Козаченков, С.А. Результаты исследования перспективного метрологического комплекса измерения длины в условиях промежуточной прецизионности / С.А. Козаченков // Приборостроение – 2022: Материалы 15-й международной научно-технической конференции. Минск, Республика Беларусь. БНТУ. – 2022. – С. 162–164.
4. Способ воспроизведения единицы длины в лазерных дальномерах на основе интерферометра Майкельсона : патент РФ № 2698699 / С.А. Губин, Д.А. Соколов, В.М. Татаренков. – Оpubл. 29.08.2019.
5. Соколов, Д.А., Эталонный измерительный комплекс длины в диапазоне до 60 м из состава Государственного первичного специального эталона единицы длины в диапазоне 24 м – 4000 км (ГПСЭД) / Д.А. Соколов, О.М. Олейник-Дзядик, И.С. Сильвестров // Труды института прикладной астрономии РАН. – 2020. – № 52. – С. 63–67.

УДК 666. 76:54.057

КЕРАМИКА ДЛЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДАТЧИКОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА Таратын И.А.¹, Колонтаева Т.В.¹, Дятлова Е.М.², Хорт А.А.², Бука А.В.²

¹Белорусский национальный технический университет

²Белорусский государственный технологический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработаны и получены новые материалы на основе модифицированного титаната бария с заданным комплексом электрофизических и эксплуатационных свойств для чувствительных элементов датчиков диоксида углерода.

Ключевые слова: сегнетокерамика, титанат бария, высокотемпературное спекание, осаждение.

CERAMICS FOR SENSITIVE ELEMENTS OF CARBON DIOXIDE SENSORS

Taratyn I.¹, Kolontaeva T.¹, Dyatlova E.², Khort A.², Buka A.²

¹Belarusian National Technical University

²Belarusian State Technological University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. New materials based on modified barium titanate with a given set of electrophysical and operational properties for sensitive elements of carbon dioxide sensors have been developed and obtained.

Key words: ferroceramics, barium titanate, high-temperature sintering, precipitation.

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

В настоящее время требуется постоянный контроль содержания углекислого газа в различных сферах деятельности человека (рабочее пространство, окружающая среда и др.). Усиленный

контроль за концентрацией CO₂ осуществляется в выбросах предприятий. К газовым сенсорам предъявляется ряд требований, таких как высокая чувствительность, быстродействие, надежность.

Полупроводниковые керамические материалы на основе модифицированного титаната бария обладают необходимым комплексом физико-технических и электрофизических характеристик, которые позволяют использовать материал для создания датчиков углекислого газа.

Целью данного исследования является разработка составов и технологии синтеза керамики для чувствительных элементов датчиков CO_2 .

Для синтеза сегнетокерамики, методом высокотемпературного спекания (ВС), на основе модифицированного титаната бария применялись следующие материалы квалификации ХЧ: BaCO_3 , TiO_2 , CuO и La_2O_3 в количестве BaTiO_3 к CuO 1:1 и сверх 100 мас. % вводилось 1, 3, 5 мас. % оксида лантана. Исходная смесь в заданном соотношении подвергалась совместному сухому помолу в шаровой мельнице, затем шихта спекалась при температуре 1250 °С с выдержкой при максимальной температуре 2 ч. После обжига материал подвергался повторному измельчению в шаровой мельнице.

Для синтеза керамики методом химического осаждения (ХО) использовались хлориды квалификации ЧДА: бария, титана, меди и лантана. В качестве растворителя применялись дистиллированная вода и этиловый спирт, в роли осадителя использовалась щавелевая кислота. Для получения модифицированного титаната бария вначале были приготовлены водные растворы хлоридов исходных компонентов с концентрациями, обеспечивающими полную стехиометрию протекания синтеза. Также подготовлен раствор щавелевой кислоты в 50%-ном избытке по отношению к необходимому для полного осаждения компонентов конечного раствора. Раствор хлорида титана подавался в водно-спиртовой раствор при постоянном перемешивании, затем в полученный раствор добавлялись другие компоненты, а также спирт, необходимый для сохранения прежнего соотношения вода/спирт. После смешивания исходных компонентов добавлялся раствор щавелевой кислоты, полученная суспензия подвергалась фильтрации и промывке раствором аммиачной и дистиллированной воды до получения нейтральной или слабощелочной среды. Осадок подвергался сушке и прокаливанию при температуре 900 °С с выдержкой при максимальной температуре 1 ч.

Из полученных керамических порошковготавливалась водная суспензия, которая наносилась на кристалл анодированного алюминия с платиновыми электродами, затем происходило вжигание в электрической печи при температуре 850 °С в течении 5 ч. После отжига кристалл подвергался монтажу в корпус сенсора.

Результаты рентгенофазового анализа подтверждено, что немодифицированный BaTiO_3 , полученный методом высокотемпературного спекания, является монофазным. Экстремум

дифракционного максимума находится при $2\theta = 32$ и 45° . С введением оксида меди (II) наблюдается снижение интенсивности основного рефлекса титаната бария, также происходит расщепление пика при 45° , что свидетельствует об увеличении степени тетрагональности перовскитовой кристаллической решетки, имеются рефлексы, связанные со свободным (непрореагировавшим) оксидом меди (II). Введение оксида лантана способствует кристаллизации новой фазы с формулой $\text{Ba}_{0,95}\text{Cu}_{0,05}\text{La}_{0,05}\text{TiO}_3$, которая обладает меньшей степенью тетрагональности перовскитовой структуры, также происходит увеличение рефлексов в области $2\theta = 32$ и 45° и снижение расщепления рефлексов при $2\theta = 45^\circ$. При синтезе методом химического осаждения рентгенофазовый анализ показал, что основной фазой является $\text{Ba}_{0,95}\text{Cu}_{0,05}\text{La}_{0,05}\text{TiO}_3$, также присутствуют максимумы, относящиеся к свободному CuO .

С помощью электронной микроскопии оценена микроструктура полученных материалов. Керамика, полученная методом химического осаждения из растворов, характеризуется большей дисперсностью и однородностью, чем материал, полученный методом (ВС), это обусловлено способом синтеза, т. к. при и осаждении применяются высокодисперсные и более однородные по составу прекурсоры. Метод химического осаждения способствует получению материала с более высокими эксплуатационными характеристиками. На рисунке 1 изображена микроструктура, полученная методом электронной микроскопии, модифицированного $\text{BaTiO}_3 + \text{CuO}$ (1:1) с добавлением 5 мас. % оксида лантана.



а



б

Рисунок 1 – Электронные снимки модифицированного $\text{BaTiO}_3 + \text{CuO}$ (1:1), дополнительно содержащий 5 мас. % La_2O_3 ((а) – метод (ВС); (б) – метод (ХО))

Проведено исследование по изучению удельного объемного электрического сопротивления керамики в зависимости от частоты измерения. Немодифицированный BaTiO_3 , полученный

двумя методами характеризовался удельным электрическим сопротивлением равным $12 \cdot 10^9$ Ом·м при частоте 25 Гц. С увеличением частоты тока (1 кГц) сопротивление стало снижаться и составило 11 (BC) и $10 \cdot 10^9$ Ом·м (ХО), при 50 кГц $\rho_v = 4,5$ и $3,8 \cdot 10^9$ Ом·м соответственно. Уменьшение сопротивления с увеличением частоты тока связано с трудностью поляризации материала, диполи не успевают переориентироваться в пространстве, тем самым не вносят значительный вклад в электрическое сопротивление материала. С увеличением содержания оксида лантана в керамике наблюдается снижение значений удельного объемного электрического сопротивления, это связано с тем, что La_2O_3 приводит к изменению электронной структуры керамики. Синтезированный керамический материал в системе $\text{BaTiO}_3 - \text{CuO} - \text{La}_2\text{O}_3$ обладает искаженной перовскитовой структурой, т. к. в решетке происходит замещение ионов титаната бария ионами меди и лантана, при замещении бария лантаном образуется валентный электрон. Для компенсации ион Ti^{4+} переходит в Ti^{3+} . Таким образом в связи с данными переходами уменьшается электрическое сопротивление материала, за счет подвижных электронов, которые легко перемещаются под действием электрического поля. CuO образует тонкий поверхностный слой на зернах BaTiO_3 . Данные материалы имеют разные типы

проводимости (p и n соответственно), сочетание вышеуказанных факторов приводит к возникновению энергетических уровней вблизи поверхности раздела фаз п.п./газ, что способствует улучшению сенсорных свойств и эксплуатационных характеристик материала.

В ходе работы было установлено, что датчики полученные на основе модифицированного титаната бария обладают повышенной чувствительностью, малым временем детектирования и релаксации. Эксплуатационные характеристики газового сенсора CO_2 с чувствительным элементом из разработанного керамического материала: коэффициент чувствительности к углекислому газу 1,25–1,29; коэффициент чувствительности к CO 1–0,7; время детектирования составляет от 40 до 60 с; время релаксации 90–120 с; рабочая температура 20–25 °С.

На основе полученных данных можно сделать вывод о том, что чувствительные элементы газовых CO_2 на основе модифицированного BaTiO_3 (ионы-модификаторы – Cu^{2+} и La^{3+}), обладают повышенной чувствительностью, сниженным временем детектирования и релаксации, а также являются достаточно стабильными.

Литература

1. Min-Suk Lee, Jërg-Uwe Meyer // A new process for fabrication CO_2 – sensing layers based on BaTiO_3 and additives // Sensor and Actuators B68(2000)293-299.

Секция 3. ФИЗИЧЕСКИЕ, ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ, МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 671.79

ДИЗАЙН-ПРОЕКТ АКАДЕМИЧЕСКОГО ЗНАКА БНТУ
Авринская А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Большой интерес для выпускников учебных заведений может представлять академический знак ВУЗА, в который закончил молодой специалист, формируя в нем память и гордость за родное учебное заведение. В связи с этим разработан академический знак Белорусского национального технического университета.

Ключевые слова: академический знак ВУЗа, дизайн.

DESIGN PROJECT OF THE ACADEMIC BADGE OF BNTU
Avrinskaya A.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Of great interest to graduates of educational institutions may be the academic badge of the university in which the young specialist graduated, forming in him memory and pride for his native educational institution. In this regard, the academic badge of the Belarusian National Technical University has been developed.

Key words: academic sign of the university, design.

Адрес для переписки: Авринская А., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: dbobuchenko@gmail.com

Знаки выпускника и жетоны выпускника выдавались еще в дореволюционной России, они свидетельствовали об окончании Императорского университета. Во времена СССР была разработана серия нагрудных знаков для выпускников средних специальных учебных заведений и высших учебных заведений, отличие между которыми заключалось в форме знака. О специализации учебного заведения говорили цвет эмали и символика под гербом СССР, который находился в центре композиции.

В композиции классических знаков можно выделить два элемента – герб и символ специализации. Герб – главный крупный элемент, который расположен строго по центру знака. Под гербом расположено более мелкое изображение, указывающее на специфику вуза.



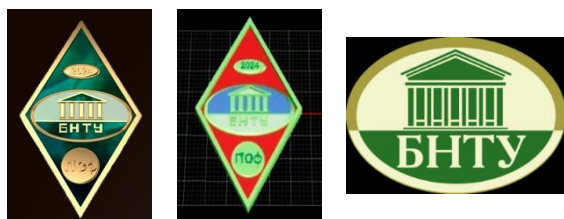
Рисунок 1 – Образцы академических знаков ВУЗов и СУЗов

Большой интерес для выпускников учебных заведений может представлять академический знак ВУЗА, в который закончил молодой специалист, формируя в нем память и гордость за родное учебное заведение.

В связи с этим на кафедре «Конструирование и производство приборов» ПСФ совместно с доцентом кафедры Луговым В.П. было решено разработать академический знак родного вуза – Белорусского национального технического университета, отталкиваясь от классических академических знаков СССР. Значок выполнен в классической форме ромба (рисунок 1, а). В центре разрабатываемого знака на месте герба расположена эмблема БНТУ (рисунок 1, в). Это центральный и самый крупный элемент композиции, который выступает в роли доминанты. На основании разработанного эскиза был проработана 3D-модель, которая будет служить эталоном для изготовления металлической модели (рисунок 1, б). 3D модель разрабатываемого знака выполнялась в программе Matrix 3D. Данная программа предназначена для моделирования ювелирных изделий с последующей их визуализацией и подбором материалов.

Над центральным элементом находится овальный выступ, который по размеру является самым маленьким элементом на знаке. На нем будет гравироваться год выпуска. В таком размерном порядке сокрыт простой, но глубокий смысл: мы все учимся на разных факультетах, мы окончим ВУЗ в разные годы, но нас объединяет одно – мы все студенты БНТУ.

Под эмблемой БНТУ располагается монето-видный элемент меньшего размера. В зависимости от факультета изображение на нем будет изменяться. Прилагаемые варианты знаков факультетов приведены на рисунке 3.



а б в

Рисунок 2 – Дизайн-проект академического знака выпускника ПСФ БНТУ (а), 3D-модель (б) и эмблема БНТУ (в)

Цветовое решение для академического знака неизменно зелено-золотое, без каких-либо вариаций. Традиционный цвет БНТУ – зеленый. Можно было бы использовать классический цвет технических ВУЗов – синий, однако это полностью перечеркнет индивидуальность данного знака.

После разработки чертежа общего вида, с расчетом размеров и подбором оптимальных параметров следует разработка технологического процесса из-

готовления знака включает в себя чеканку из листового металла, гравировку мелких элементов, сборку с застежкой, полирование. В зависимости от используемого металла предусматривается лакирование либо гальваническое покрытие.



Рисунок 3 – Элементы с символикой факультетов

Последним этапом выполняется нанесение цветной эмали на отдельные участки изделия.

Технологический процесс предусматривает изготовление основы знака из драгоценного или недрагоценного металла или сплава (серебра, меди или алюминия) методом штамповки. Художественная отделка включает гальваническое покрытие отдельных участков и холодное эмалирование в приведенные ранее цвета.

UDC 004.92, 004.925.5

COLOUR VISUALIZATION METHOD OF X-RAY SPECTRA Balukho I.N., Dudchik Y.I., Kolchevsky N.N.

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

Abstract. A method for color visualization of X-ray spectra has been developed, which allows coloring the X-ray spectra correspondingly of energy spectra. The program "X-ray-RGB-tube" for summarizing and color visualization of X-ray spectra was developed. Simulation of the "white" source with the developed program are discussed.
Key words: color visualization, X-Ray, "X-ray-RGB-tube".

МЕТОД ЦВЕТОВОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОВ Балухо И.Н., Дудчик Ю.И., Кольчевский Н.Н.

*НИИ ПФП им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Разработан метод цветовой визуализации рентгеновских спектров, позволяющий окрашивать рентгеновские спектры соответственно энергетическим спектрам. Разработана программа «X-ray-RGB-tube» для суммирования и цветовой визуализации рентгеновских спектров. Рассмотрено моделирование «белого» источника с помощью разработанной программы.

Ключевые слова: цветровая визуализация, рентгеновское излучение, «X-ray-RGB-tube».

*Address for correspondence: Kolchevsky N.N., Kurchatova str. 7 – 403, 220045, Minsk, Republic of Belarus.
e-mail: kolchevsky@bsu.by*

Developed a method of colour visualization of X-ray spectra by energy characteristics. On the basis of the method developed and created the program "X-ray-RGB-tube" [1]. For color visualization of the X-ray spectrum and analysis of the spectrum of the X-ray source, each energy of the spectrum is matched

with an RGB vector, which represents the intensity value of red, green and blue colors:

$$(X_1, X_2, X_3) \quad (1)$$

where X_1, X_2, X_3 – numbers in the range from 0 to 255.

First step was to set the colour palette corresponding to the X-ray spectrum. The energy range for X-rays was chosen from 0.1 keV to 100 keV, and further transformed using the following formula:

$$\begin{aligned} \min : \log_{10}(0,1 \text{ keV}) + 1 &= -1 + \log_{10}(\text{keV}) + 1 = 0 + \log_{10}(\text{keV}) \\ \max : \log_{10}(100 \text{ keV}) + 1 &= 2 + \log_{10}(\text{keV}) + 1 = 3 + \log_{10}(\text{keV}) \end{aligned} \quad (2)$$

Defined the colour scale for the X-ray spectrum. The range of energies is divided into 7 intervals, according to the colours of the rainbow (optical spectrum), which describe the number of colours according to the interval. The minimum RGB vector values, outside the range, were taken as black and the maximum values – as white.

Since in the RGB layout orange is a combination of red and yellow (hue), there will be fewer basic intervals in total (figure 1, a).

As can be seen from Figure 1a, the transition from one colour to other changes a certain RGB coordinate, then the number of hue steps is 255. Dividing the energy range of X-ray emission into intervals in accordance with the transitions from colour to colour, obtained the boundary values of energy, which will sort the spectral lines into colours (figure 1, b).

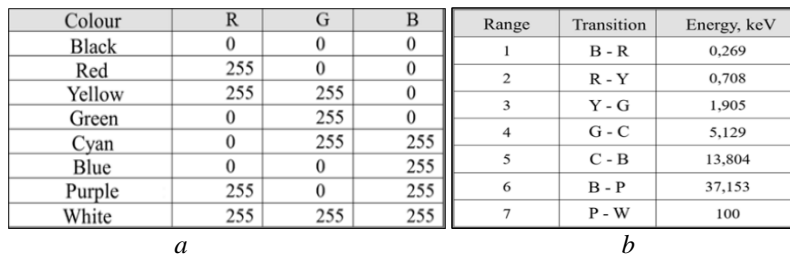


Figure 1 – RGB vectors of colours (a) and colour intervals with their boundary energies (b)

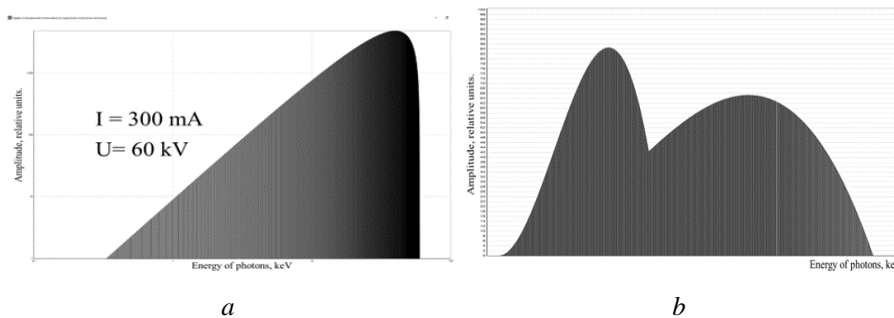


Figure 2 – Colour plot of the spectral intensity of the stopping spectrum in logarithmic scale (a) and colour stopping spectrum of the modified tube (with complex anode) (b)

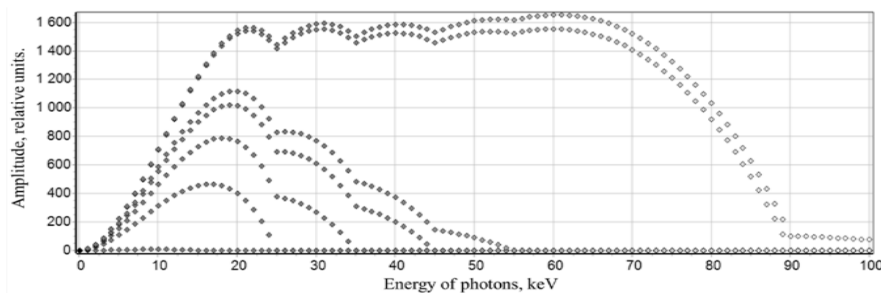


Figure 3 – Obtaining the stopping spectrum of a "white" source

Consider the task of forming the "white colour" source using the spectrum colouring method. The "white" source can be either a source with a complex anode, or a source consisting of several sources, simultaneously or sequentially emitting objects in the experiment.

The summation of the spectra, as a source with a complex anode, as well as multiple sources, is described by the following expression:

$$I(\lambda) = \sum_i I_i(\lambda) = \sum_i k_i f(\lambda(U)) = f(\lambda(U)) \sum_i k_i = k^* \cdot \frac{(\lambda - \lambda_{\min})}{\lambda_{\min} \cdot \lambda^3} \quad (3)$$

where k^* – constant, depending on the parameters, independent from the wavelength.

Hence, by summing the spectral intensities, obtained intensity, which is represented by the summation of functions $f(\lambda(U))$, depending on the wavelength (on energy) multiplied by the constant k^* .

Then the integral colour of the spectrum – the source colour – will be given by the condition of intensity mixing. Integrating this principle into the program, obtained the following result of summation and colour visualization of spectra with their common colour (source colour) (figure 2).

To create a "white" source, it is necessary to obtain a spectrum with uniform intensity. Considering all peculiarities of construction and addition of spectra, modelling of a white source was performed in the seen from the calculation, due to the addition of intensity spectra of different sources it is possible to obtain a spectrum with a "shelf", where the intensity is quasi-linear.

References

1. Kolchevskaya, I.N. Modelling of X-ray optical systems / I.N. Kolchevskaya, P.V. Petrov, N.N. Kolchevsky // Computer Technologies and Data Analysis (CTDA'2022): proceedings of the III International Scientific and Practical Conference, Minsk, 21–22 April. 2022. – BSU; V. Skakun (editor-in-chief) [and others]. – Minsk : BSU. – 2022. – С. 217–219.

УДК 535.3

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ МНОГОСЛОЙНОЙ СРЕДЫ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ НАГРЕВЕ

Бобученко Д.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Получено аналитическое решение уравнения теплопроводности для многослойной среды при периодическом нагреве.

Ключевые слова: уравнение теплопроводности, коэффициент теплопроводности, коэффициент температуропроводности, коэффициент теплопередачи, многослойная среда.

ANALYTICAL SOLUTION OF THE HEAT CONDUCTIVITY EQUATION FOR A MULTILAYER MEDIUM WITH PERIODIC HEATING

Babuchenka D.S.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. An analytical solution to the heat conduction equation for a multilayer medium with periodic heating is obtained.

Key words: heat equation, thermal conductivity coefficient, thermal diffusivity, heat transfer coefficient, multilayer environment.

*Адрес для переписки: Бобученко Д.С., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: dbobuchenko@gmail.com*

Многослойные среды, состоящие из совокупности слоев различных материалов, имеют огромное практическое применение. К ним относятся различные оптические покрытия, защитные покрытия, тонкопленочные фотоэлектрические элементы, тонкопленочные аккумуляторы, слоистая среда, созданная с целью охлаждения и многие другие. Расчет и анализ температурных полей в таких структурах является актуальной задачей. А также существует большое число обратных задач [1; 3], когда по значениям температур, необходимо определить теплофизических свойства материалов и их толщины, и различные тепловые потоки. Для решения этих задач может быть использован метод периодического нагрева (методов регулярного режима третьего рода, метод температурных волн) и для обратных задач полезно иметь аналитические формулы описывающие температурные поля в многослойных структурах при периодическом нагреве. Метод температурных волн обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами, в частности для измерения этим методом необходимо малое количество материала из-за резкого затухания температурной волны.

В данной работе получено аналитическое решение уравнение теплопроводности для многослойной среды при периодическом нагреве.

Рассмотрим ограниченное пространство из многослойного материала. Распределение температуры Ω_i в i -том слое, определяется уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial \Omega_i}{\partial t} = a_i \frac{\partial^2 \Omega_i}{\partial x^2}, \quad t > 0, \quad 0 \leq x < l, \quad (1)$$

с начальным условием: $\Omega_i(t = 0, x) = \Omega_0$, на границе ($x = 0$) температура меняется по гармоническому закону: $\Omega_i(t, 0) = \Omega_0 + T_{\max} \sin(\omega t)$, где a_i – коэффициент температуропроводности i -того слоя, Ω_0 – начальная температура среды, Ω_{\max} – амплитуда колебаний температуры, $\omega = 2\pi/\tau_0$ – круговая частота, τ_0 – период колебаний. При идеальном тепловом контакте между слоями:

$\Omega_i(d_i) = \Omega_{i+1}(d_i) \quad \lambda_i \frac{\partial \Omega_i}{\partial x} \Big|_{x=d_i} = \lambda_{i+1} \frac{\partial \Omega_{i+1}}{\partial x} \Big|_{x=d_i}$
и условиями 3-рода на границе среды:

$$-\lambda_n \frac{\partial \Omega_n}{\partial x} \Big|_{x=l} = -\alpha(\Omega_s - \Omega_0),$$

где λ_i – коэффициенты теплопроводности материала i -го слоя, α – коэффициент теплопередачи на правой границе среды, l – длина образца, d_i – граница раздела между i и $i+1$ слоями. После замены переменной $T_i(x,t) = \Omega_i(x,t) - \Omega_0$ в уравнении (1) и начальных, граничных условиях, получим следующее уравнение с соответствующими условиями:

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = a_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2}, \quad t > 0, \quad 0 \leq x < l, \quad (2)$$

$$T_i(t = 0, x) = 0, \quad (2.1)$$

$$T_1(t, 0) = T_{\max} \sin(\omega t) \quad (2.2)$$

$$T_i(d_i) = T_{i+1}(d_i), \quad \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \Big|_{x=d_i} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial x} \Big|_{x=d_i} \quad (2.3)$$

$$-\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial x} \Big|_{x=l} = -\alpha T_s \quad (2.4)$$

Решение уравнения (2) можно представить в виде произведения двух функций: $(T(x,t) = \chi(x)\eta(t))$, тогда при подстановке в уравнение (2) получится система из двух дифференциальных уравнений [1]:

$$\frac{\partial^2 \chi}{\partial x^2} + \beta^2 \chi = 0, \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} + \beta^2 a \eta = 0. \quad (3)$$

Введя мнимую величину: $i\omega = -\beta^2 a$, и $\varepsilon^2 = -\beta^2$ следует: $\varepsilon = \sqrt{\frac{i\omega}{a}} = (1+i) \sqrt{\frac{\omega}{2a}}$.

Решениями уравнений (3) являются следующие функции [1]:

$$\chi(x) = B \sin h(\varepsilon x) + C \cosh(\varepsilon x),$$

$$\eta(t) = e^{i\omega t}.$$

B, C – постоянные. Тогда, перейдя к действительным величинам, решение уравнения (2) можно записать:

$$T_i(x,t) = A_i e^{-b_i x} \sin(\omega t - b_i x + \varphi_i), \quad (4)$$

$b_i = \sqrt{\frac{\omega}{2a_i}}$. A_i, φ_i – величины, определяемые из начальных, граничных условий, и условий на границах сред. Из начального условия ясно, что $A_1 = T_{\max}$ и $\varphi_1 = 0$. Использование условия идеальности теплового контакта (2.2) и общего решения (4) приводит к следующей системе уравнений:

$$A_i e^{-b_i d_i} \sin(\omega t - b_i d_i + \varphi_i) = A_{i+1} \times$$

$$\times e^{-b_{i+1} d_i} \sin(\omega t - b_{i+1} d_i + \varphi_{i+1}),$$

$$A_i \lambda_i b_i e^{-b_i d_i} \sin\left(\omega t - b_i d_i + \varphi_i + \frac{\pi}{4}\right) =$$

$$= A_{i+1} \lambda_{i+1} b_{i+1} e^{-b_{i+1} d_i} \sin\left(\omega t - b_{i+1} d_i + \varphi_{i+1} + \frac{\pi}{4}\right).$$

Если из второе уравнение разделить на первое получим:

$$\lambda_i b_i \frac{\sin(\omega t - b_i d_i + \varphi_i + \frac{\pi}{4})}{\sin(\omega t - b_i d_i + \varphi_i)} =$$

$$= \lambda_{i+1} b_{i+1} \frac{\sin(\omega t - b_{i+1} d_{i+1} + \varphi_{i+1} + \frac{\pi}{4})}{\sin(\omega t - b_{i+1} d_{i+1} + \varphi_{i+1})}.$$

Из этой системы уравнений и так как $\sin(x + \frac{\pi}{4}) = \frac{1}{\sqrt{2}}(\sin(x) + \cos(x))$, получаются следующие рекурсивные выражения для вычисления коэффициентов φ_{i+1}, A_{i+1} на границах сред:

$$\varphi_{i+1} = -\omega t + b_{i+1} d_i + \arctg \left[\frac{1}{\frac{\lambda_i b_i}{\lambda_{i+1} b_{i+1}} \left\{ 1 + \frac{1}{\operatorname{tg}(\omega t - b_i d_i + \varphi_i)} \right\} - 1} \right],$$

$$A_{i+1} = A_i e^{-(b_i - b_{i+1}) d_i} \frac{\sin(\omega t - b_i d_i + \varphi_i)}{\sin(\omega t - b_{i+1} d_i + \varphi_{i+1})}.$$

На правой границе среды температура среды вблизи поверхности:

$$T_s = \frac{\sqrt{2}}{\alpha} A_n \lambda_n b_n e^{-b_n l} \sin\left(\omega t - b_n l + \varphi_n + \frac{\pi}{4}\right).$$

На рисунках 1, 2 представлены распределение температуры от длины для различной моментов времени пятислойной среды со следующими параметрами: коэффициенты температуропроводности; $9 \cdot 10^{-5}; 7 \cdot 10^{-5}; 5 \cdot 10^{-5}; 9 \cdot 10^{-5}; 1,5 \cdot 10^{-4}$ ($\text{м}^2/\text{с}$), коэффициенты теплопроводности 150; 120; 80; 150; 200 ($\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$); границы раздела сред: 2,5; 5; 10; 15; 20 (мм) для различных моментов времени.

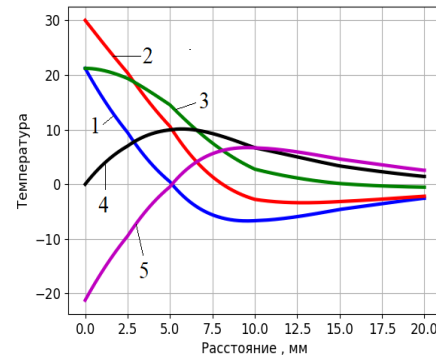


Рисунок 1 – Зависимость распределения температуры от длины при частоте 0.5 Гц для моментов времени $t = 0,25$ с (1); 0,5 с (2); 0,75 с (3); 1,0 с (4); 1,25 с (5)

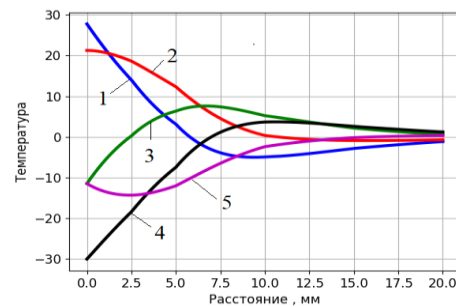


Рисунок 2 – Зависимость распределения температуры от длины при частоте 0.75 Гц для моментов времени $t = 0,25$ с (1); 0,5 с (2); 0,75 с (3); 1,0 с (4); 1,25 с (5)

Распределение температуры, как видно из рисунков существенно зависит от частоты, что может быть основой для определения теплофизических параметров многослойных материалов через решения обратной задачи [2; 3].

Литература

1. Шорин, С.Н. Теплопередача / С.Н. Шорин. – М. : Высшая школа, 1964. – 492 с.
2. Бэк, Дж. Некорректные обратные задачи теплопроводности / Дж. Бэк, Б. Блакуэлл, Ч. Сент-Клэр. – М. : Мир, 1989. – 312 с.
3. Восстановление граничных условий теплообмена неоднородных тел путем решения обратных задач теплопроводности / Н.В. Пилипенко [и др.]. – СПб. : Университет ИТМО, 2021. – 69 с.

УДК 537.874

ТРЕХСЛОЙНЫЕ СИММЕТРИЧНЫЕ ЭЛАСТИЧНЫЕ И ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭКРАНЫ НА ОСНОВЕ ФОЛЬГИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Бойправ О.В., Богущ Н.В.

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

Аннотация. В работе представлена методика изготовления трехслойных электромагнитных экранов на основе фольгированных материалов. Эти экраны являются симметричными относительно фронта распространения электромагнитного излучения, т. к. структура и состав их первого и третьего слоев являются идентичными друг другу. Эти экраны характеризуются эластичностью и воздухопроницаемостью за счет того, что соответствующими свойствами характеризуются материалы, на основе которых они изготовлены. Экспериментальным путем установлено, что значения коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц экранов, изготовленных в соответствии с представленной методикой, изменяются в пределах от –10,0 до –35,0 дБ. Такие экраны целесообразно использовать для защиты радиоизмерительных приборов от воздействия СВЧ-помех.

Ключевые слова: алюминий, коэффициент отражения, коэффициент передачи, медь, фольгированный материал, электромагнитный экран.

THREE-LAYER SYMMETRICAL ELASTIC AND AIR-PERMEABLE ELECTROMAGNETIC SHIELDS BASED ON FOIL MATERIALS

Boiprav O., Bogush N.

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

Abstract. The paper presents the method for manufacturing three-layer electromagnetic shields based on foil materials. These shields are symmetrical with respect to the electromagnetic radiation propagation front, since the structure and composition of their first and third layers are identical to each other. These shields are characterized by elasticity and air-permeable due to the fact that the materials on which they are made are characterized by the corresponding properties. It has been established experimentally that electromagnetic radiation transmission coefficient values in the frequency range 0,7–17,0 GHz of the shields manufactured in accordance with the presented method vary from –10,0 to –35,0 dB. It is advisable to use such shields to protect radio measuring equipment from the effects of microwave interference.

Key words: aluminum, reflection coefficient, transmission coefficient, copper, foil material, electromagnetic shield.

*Адрес для переписки: Бойправ О.В., ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: smi@bsuir.by*

В работе [1] представлена методика изготовления эластичных и воздухопроницаемых электромагнитных экранов, которая состоит в фиксации с одинаковым шагом на одной из поверхностей нетканого синтетического полотна прямоугольных фрагментов фольгированных материалов, характеризующихся одинаковым размером. Такие экраны являются несимметричными относительно фронта распространения электромагнитного излучения (ЭМИ), т. к. состав и структура их слоев не являются идентичными друг другу. Авторами была выдвинута гипотеза, в соот-

ветствии с которой можно увеличить значения коэффициента передачи ЭМИ электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с методикой, представленной в работе [1], путем придания таким экранам симметричной структуры относительно фронта распространения ЭМИ. В связи с этим цель исследования, результаты которого приведены в докладе, состояла в установлении закономерностей изменения значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в СВЧ-диапазоне симметричных эластичных и воздухопроницаемых электромагнитных экранов, изготовленных в

соответствии с методикой, основанной на методике, представленной в работе [1], в зависимости от состава фольгированного материала, из которого изготовлены фрагменты, входящие в структуру таких экранов.

В ходе достижения этой цели были решены следующие задачи: 1) в соответствии с методикой, основанной на методике, представленной в работе [1], изготовлены на основе алюминий- и медьсодержащих фольгированных материалов; 2) выполнены измерения значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц изготовленных экспериментальных образцов; 3) проведен сравнительный анализ характеристик отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц изготовленных экспериментальных образцов и экспериментальных образцов, изготовленных в соответствии с методикой, представленной в работе [1].

Методика, основанная на методике, представленной в работе [1], и использованная для изготовления экспериментальных образцов электромагнитных экранов при решении первой из задач, поставленных для достижения цели исследования, состояла в фиксировании с одинаковым шагом и одинаковым образом на обеих поверхностях нетканого синтетического полотна характеризующихся одинаковыми размером прямоугольных фрагментов алюминий- или медьсодержащих фольгированных материалов. В структуру изготовленных экспериментальных образцов входили три слоя, первый и третий из которых были идентичными и представляли собой совокупность прямоугольных указанных фрагментов. Соотношение между суммарной площадью последних и суммарной площадью участков поверхностей нетканого синтетического полотна, не покрытых указанными фрагментами, составляло 75,0 %.

По результатам решения второй и третьей задач, поставленных для достижения цели исследования, было установлено, что значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–6,0 ГГц рассмотренных симметричных электромагнитных экранов на основе алюминийсодержащих фольгированных материалов на 2,0–20,0 дБ ниже, чем значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–6,0 ГГц несимметричных электромагнитных экранов, рассмотренных в работе [1]. В диапазоне частот 6,0–17,0 ГГц разница между величинами указанного параметра незначительна (рисунок 1).

Значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазонах частот 0,7–2,0 ГГц и 2,0–17,0 ГГц рассмотренных симметричных электромагнитных экранов на основе медьсодержащих фольгированных материалов соответственно на 2,0–10,0 дБ и на 10,0–20,0 дБ ниже, чем значения коэффициента передачи ЭМИ в указанных диапазонах частот

несимметричных электромагнитных экранов, рассмотренных в работе [1] (рисунок 2).

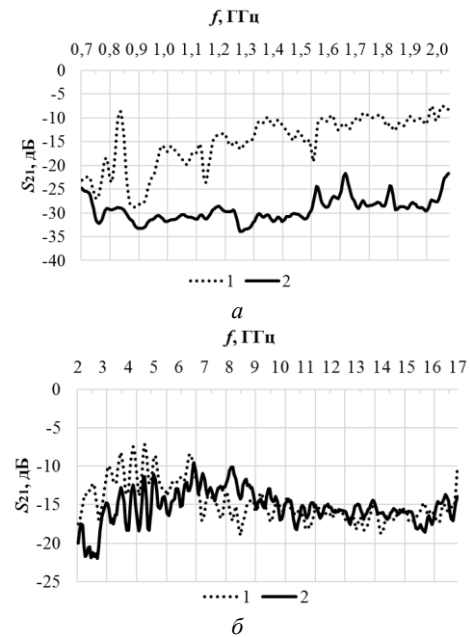


Рисунок 1 – Частотные зависимости коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне 0,7–2,0 ГГц (а) и 2,0–17,0 ГГц (б) образцов несимметричных (кривые 1) и симметричных (кривые 2) электромагнитных экранов на основе алюминийсодержащих фольгированных материалов

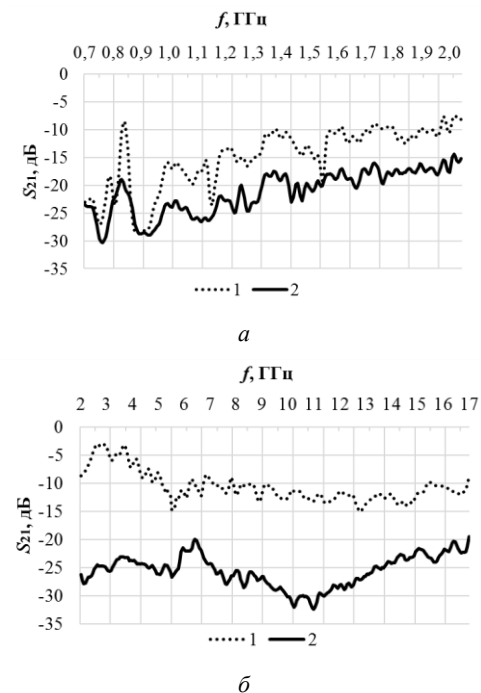


Рисунок 2 – Частотные зависимости коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне 0,7–2,0 ГГц (а) и 2,0–17,0 ГГц (б) образцов несимметричных (кривые 1) и симметричных (кривые 2) электромагнитных экранов на основе медьсодержащих фольгированных материалов

Рассмотренные электромагнитные экраны целесообразно использовать для защиты радиоизмерительных приборов от воздействия СВЧ-помех.

Благодарности. Работа выполнена в рамках НИР «Эластичные и воздухопроницаемые электромагнитные экраны на основе фольгированных материалов для обеспечения информационной и экологической безопасности» по заданию 1.5 «Разработка новых материалов и технологий для систем электромагнитной защиты радиоэлектронного и информационного оборудования, биологических объектов от воздействия широкого спектра электромагнитных излучений, обес-

печения электромагнитной безопасности населения и электромагнитной совместимости электро-, радиотехнических средств и оборудования» ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021–2025 гг.

Литература

1. Boiprav, O. Improved Technique for Manufacturing of the Elastic Air-Permeable Electromagnetic Radiation Absorbers Based on Foil / O. Boiprav, S. A. Abdaljlil, A. Zerek // 2023 IEEE 3rd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA), Benghazi, Libya, 21–23 May 2023. – Benghazi : IEEE, 2023. – P. 501–509.

УДК 004.056:061.68

АЛГОРИТМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ ПОЖАРНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ С КАНАЛОМ ОПОВЕЩЕНИЯ ПО НИЗКОВОЛЬТНЫМ СЕТЯМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА Бокуть Л.В.¹, Деев Н.А.²

¹Белорусский национальный технический университет,
²Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе на основе методов оптимальной и квазиоптимальной обработки сложного сигнала предложены алгоритмы устройств передачи и приема информации для систем пожарной сигнализации с каналом оповещения по промышленной сети электропитания.

Ключевые слова: передача информации, периодическая двоичная псевдослучайная последовательность, устройства обработки информации.

INFORMATION TRANSFER ALGORITHMS IN FIRE ALARM SYSTEMS WITH THE CHANNEL OF THE NOTIFICATION ON LOW-VOLTAGE ALTERNATING CURRENT MAINS Bokut L.¹, Deev N.²

¹Belarusian National Technical University
²The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus

Summary. In the work on the basis of methods of optimum and quasioptimum processing of a difficult signal algorithms of devices of transfer and reception of information for fire alarm systems with the channel of the notification on industrial network of power supply are offered.

Keywords: information transfer, periodic binary pseudorandom sequence, information processing devices.

Адрес для переписки: Бокуть Л.В., ул. Якуба Коласа, 22, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: lvbokut@bntu.by

В работе рассматриваются алгоритмы формирования сложных сигналов на основе передачи адресов абонентов двоичными числами.

Модель сообщения от i -го абонента представляется в виде функции $X_i(t)$, принимающей значение $X_i(t) = \{\pm 1\}$ с тактовой частотой $fT = 1/T$, где T – длительность символа.

Функция $g_i(t)$ представляет для каждого из k абонентов периодическую двоичную псевдослучайную последовательность (ПСП), код формирования которой меняется вместе со сменой последующих k абонентов.

Таким образом, число элементов ПСП $g_i(t)$ определяется тактовой частотой ПСП

$$f\Pi = 1/\tau_э,$$

где $\tau_э$ – длительность элемента ПСП.

Примем $\tau_э = T/40$.

Передача информации осуществляется путем фазовой манипуляции несущего колебания последовательностью $x_i(t) \cdot g_i(t)$, то есть сигнал представляется в виде:

$$s(t) = a0X_i(t)g_i(t) \cos[\omega t + \beta i]. \quad (1)$$

где ω и β_i – частота и начальная фаза сигнала i -го абонента (в общем случае). При кодовом (адресном) разделении абонентов ω и β остаются неизменными для всех абонентов.

При последовательной передаче информации от всех абонентов с учетом смены ПСП через каждые K абонентов общий сигнал $S_{\Sigma}(t)$ представляется выражением:

$$S_{\Sigma}(t) = a_0 \sum_{j=1}^M g_j(t) \text{rect} \left[\frac{t-jT_k}{T_k} \right] X_j(t) \cos[\omega_0 t + \beta]. \quad (2)$$

Здесь $M = N/K = 250/K$, $X_j(t)$ – последовательность адресных символов от J -й группы абонентов длительностью T_k

Структурно-функциональная схема формирования сигнала от группы абонентов представлена на рисунке 1.

Схема включает генератор тактовой частоты (ГТЧ), генератор псевдослучайной последовательности (ГПСЧ), коммутатор (Комм), делитель частоты (ДЧ), генератор несущего колебания (ГН), фазовый манипулятор (ФМ), умножитель (П), источники информации (ИИ), мультиплексор (МП), формирователь информационного потока (ФИП), усилитель мощности (УМ).

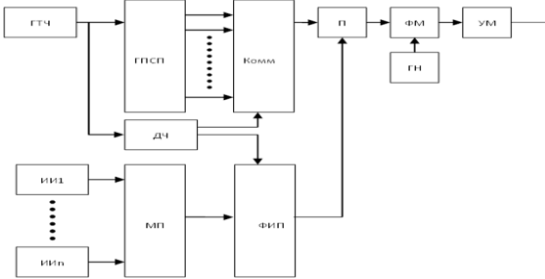


Рисунок 1 – Структурно-функциональная схема формирования сигнала от группы абонентов

Рассмотрены алгоритмы устройств обработки информации в системах пожарной сигнализации с каналом оповещения по сети переменного тока. На входе приемного устройства действует смесь $r(t)$ сигнала (2) и помехи

$$y(t): r(t) = S_{\Sigma}(t) + y(t) \quad (3)$$

Помеха представляет собой случайный процесс с плотностью распределения вероятности (ПРВ) $W_n(y)$. Считаем отсчеты случайного процесса $y(t)$ статистически независимыми, поэтому многомерная $W_n(y) = \prod_{i=1}^N W_n(y_i)$.

Функция правдоподобия относительно оцениваемых сигналов $S_{\Sigma}(t)$ определяется на основе ПРВ $W_n(\vec{y})$, то есть

$$W \left[\vec{r} / \vec{\lambda} \right] = W_n \left[\vec{r} - S_{\Sigma}(\vec{\lambda}) \right] \quad (4)$$

Здесь $\vec{\lambda}$ – вектор оцениваемых параметров сигнала. Сигнал $S_{\Sigma}(t, \vec{\lambda})$ представлен в виде суммы квадратурных компонент:

$$S_{\Sigma}(t, \vec{\lambda}) = a_0 S_c(t, \vec{x}) \cos(\beta) - a_0 S_s(t, \vec{x}) \sin(\beta), \quad (5)$$

$$S_c(t, \vec{x}) = \sum_{j=1}^M g_j(t) \text{rect} \left[\frac{t-jT_k}{T_k} \right] X_j(t) \cos(\omega_0 t), \quad (6)$$

$$S_s(t, \vec{x}) = \sum_{j=1}^M g_j(t) \text{rect} \left[\frac{t-jT_k}{T_k} \right] X_j(t) \sin(\omega_0 t). \quad (7)$$

Квадратурные составляющие сигнала, зависящие от информационной последовательности $X_j(t)$ вектор $\vec{\lambda}$ включает X – информационный параметр и начальную фазу β .

Обозначим $A_c(y) = a_0 \cos(\beta)$, $A_s(y) = a_0 \sin(\beta)$ Компоненты $A_c(y)$ и $A_s(y)$ зависят от амплитуды и фазы сигнала и могут быть оценены для обеспечения более качественного по сравнению с некогерентным приемом сигнала, если β предполагается случайной равномерно распределенной величиной в интервале $[0, 2\pi]$. Таким образом, сигнал представляется в виде:

$$S_{\Sigma}(t, X, A_c, A_s) = S_c(t, X)A_c + S_s(t, X)A_s. \quad (8)$$

Максимально правдоподобные оценки формулируются на основе уравнений:

$$X_k^*(t) = \text{sign}[A_c^* J_{cK\Sigma} + A_s^* J_{sK\Sigma}], \quad (9)$$

$$A_c^* = \frac{1}{H} \sum_{j=K-H}^K X_j^* J_{cJ}; \quad A_s^* = \frac{1}{H} \sum_{j=K-H}^K X_j^* J_{sJ}, \quad (10)$$

$$J_{cJ} = \int_{(j-1)T_{\Sigma}}^{jT_{\Sigma}} Z[r(t)] g^*(t) \cos(\omega_0 t) dt, \quad (11)$$

$$J_{sJ} = \int_{(j-1)T_{\Sigma}}^{jT_{\Sigma}} Z[r(t)] g^*(t) \sin(\omega_0 t) dt, \quad (12)$$

$$Z[y] = - \frac{d \ln W_{\Pi}(y)}{dy}, \quad (13)$$

$$J_{cK\Sigma} = \frac{1}{l} \sum_{k=j-l}^k J_{cJ}, \quad (14)$$

$$J_{sK\Sigma} = \frac{1}{l} \sum_{k=j-l}^k J_{sJ}, \quad (15)$$

здесь $Z[y]$ – амплитудная характеристика безынерционного нелинейного преобразователя (БНП) (для случая слабого сигнала по сравнению с помехой).

Устройство начальной и текущей синхронизации обеспечивают начальную синхронизацию по пилот-сигналу, включаемому в начале передаваемого цикла. Поддержание синхронизации в течение цикла приема требует введения обратной связи по информации.

Структурно- функциональная схема, рекомендуемая алгоритмами (8)–(15), представлена на рисунке 2.

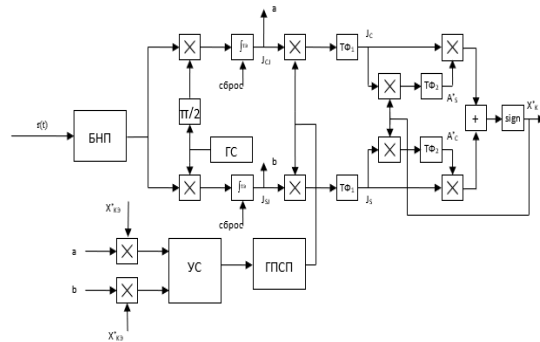


Рисунок 2 – Структурно-функциональная схема обработки сигнала от группы абонентов: ГФ – трансверсальный фильтр, ГС – генератор сигнала, УС – устройство синхронизации

Литература

1. 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.

2. Прием сигналов на фоне помех / В.А. Чердынцев [и др.]. – Минск : БГУИР, 1995.

УДК 530.182

ПРИМЕНЕНИЕ ФУНКЦИЙ ЛЯПУНОВА К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОДОЛЖИМОСТИ РЕШЕНИЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Бокуть Л.В., Климович Т.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В теории устойчивости движения функция Ляпунова является скалярной функцией, используемой для исследования устойчивости решения обыкновенных дифференциальных уравнений с помощью второго (прямого) метода Ляпунова. Наиболее важным преимуществом метода функций Ляпунова перед всеми остальными подходами к решению разнообразных задач устойчивости является его универсальность. В настоящее время он является единственным математическим методом, который может использоваться для исследования устойчивости решений динамических систем любого нелинейного вида и любой размерности.

Ключевые слова: функции Ляпунова, системы дифференциальных уравнений, устойчивость.

APPLICATION OF LYAPUNOV FUNCTIONS TO THE STUDY OF CONTINUABILITY OF SOLUTIONS OF DIFFERENTIAL SYSTEMS

Bokut L., Klimovich T.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. In the theory of stability of motion, the Lyapunov function is a scalar function used to study the stability of the solution of ordinary differential equations using the second (direct) Lyapunov method. The most important advantage of the Lyapunov function method over all other approaches to solving various stability problems is its universality. Now it is the only mathematical method that can be used to study the stability of solutions of dynamical systems of any nonlinear type and any dimension.

Key words: Lyapunov functions, differential systems, stability.

*Адрес для переписки: Климович Т.А., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: tanya.tatina.klimovich@mail.ru*

Функции Ляпунова являются мощным инструментом для исследования продолжимости решений систем дифференциальных уравнений. Они позволяют оценить поведение системы в окрестности определенной точки, а также определить ее устойчивость. Функция Ляпунова – это неотрицательная и непрерывная функция, которая позволяет оценить энергию или изменение состояния системы. Используя такую функцию, можно доказать сходимость или расходимость решений системы дифференциальных уравнений.

Под продолжимостью решений понимается способность решений системы дифференциальных уравнений сохраняться на всем интервале определения. Продолжимость решений системы дифференциальных уравнений зависит от свойств системы и начальных условий. В общем случае, если система дифференциальных уравнений является линейной и имеет постоянные коэффициенты, то существует теорема о продолжимости решений, которая гарантирует существование и един-

ственность решений на всем интервале определения. Однако для нелинейных систем или систем с переменными коэффициентами, продолжимость решений может быть установлена сложнее. В этом случае необходимо провести дополнительные исследования системы, такие как анализ устойчивости, сходимость и другие методы анализа [1]. Для исследования продолжимости решений систем дифференциальных уравнений используется так называемый метод Ляпунова. В этом методе строится функция Ляпунова, которая при определенных условиях может быть использована для доказательства устойчивости системы [2].

Существуют три основных типа функций Ляпунова: положительно определенная, отрицательно определенная, знакопостоянная функция.

Эти типы функций позволяют провести анализ устойчивости дифференциальных систем и определить поведение решений на всем интервале определения. Пример применения функции Ляпунова представлен на рисунке 1.

При исследовании продолжимости решений систем дифференциальных уравнений используются различные виды функций Ляпунова, в том числе квадратичные и запасные энергии, функции типа Ляпунова-Розенблока и др. Выбор конкретной функции зависит от особенностей системы в требуемых условиях продолжимости.

Существует также следующая классификация функций Ляпунова:

1. Прямая функция Ляпунова – это функция, которая описывает изменение энергии системы. Она положительно определена и ее производная по времени должна быть отрицательной.

2. Косвенная функция Ляпунова – это функция, которая описывает изменение расстояния между состояниями системы. Она положительно определена и ее производная по времени должна быть отрицательной.

Исследовать на устойчивость $\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial t} = -2y - x(x-y)^2 \\ \frac{\partial y}{\partial t} = 3x - \frac{3}{2}y(x-y)^2 \end{cases}$

Решение: Функция $V = ax^2 + by^2$ удовлетворяет условиям теоремы Ляпунова об устойчивости:

1) $V(x,y) \geq 0, V(0,0) = 0$

2) $\frac{\partial v}{\partial t} = 2ax(-2y - x(x-y)^2) + 2by(3x - \frac{3}{2}y(x-y)^2) = -4axy - 2ax^2(x-y)^2 + 6bxy - 3by^2(x-y)^2 = -2ax^2(x-y)^2 - 3by^2(x-y)^2 - 2xy(2a-3b)$
 пусть $a=3, b=2$, тогда $V = 3x^2 + 2y^2 > 0$

$\frac{\partial v}{\partial t} = -6x^2(x-y)^2 - 6y^2(x-y)^2 = -6(x-y)^2 \cdot (x^2 + y^2) \leq 0$

Следовательно, точка покоя устойчива

Рисунок 1 – Применение положительно определенной функции Ляпунова

Использование функций Ляпунова позволяет проводить более глубокий анализ продолжимости решений систем дифференциальных уравнений. Применение функций Ляпунова основано на теореме Ляпунова о продолжимости решений. Эта теорема гласит, что если существует функция Ляпунова, удовлетворяющая определенным условиям, то решения системы будут продолжимы на бесконечности или в окрестности краевой точки [3].

Пусть дано дифференциальное уравнение третьего порядка:

$$\ddot{x} + a\dot{x} + b\dot{x} = 0, \quad (1)$$

или система

$$\begin{cases} \dot{x} = y, \\ \dot{y} = z - ay, \\ \dot{z} = -by^3. \end{cases} \quad (2)$$

Критерий Винтнера-Еругина не гарантирует продолжимости всех решений. В самом деле $|by^3| \leq |b||y|^3$. Обозначим $|y| = u$. Тогда получим:

$$\int_A^\infty \frac{du}{u^3} \neq \infty. \quad (3)$$

Отсюда можно сделать вывод, что для установления продолжимости на $[0; \infty]$ более эффективно использование функций Ляпунова, нежели признака Винтнера-Еругина.

Функция Ляпунова должна обладать следующими свойствами:

1. Неотрицательность: значение функций Ляпунова должно быть неотрицательным для всех значений аргумента.

2. Возрастание: функция Ляпунова должна увеличиваться при движении системы вдоль траектории.

3. Дифференцируемость: функция Ляпунова должна быть дифференцируемой в заданной области.

4. Определенность знака производной: производная функции Ляпунова должна быть отрицательной или нулевой.

5. Нулевость в краевых точках: Функция Ляпунова должна быть равна нулю в краевых точках [4].

Функции Ляпунова играют важную роль в контроле и стабилизации систем, так как позволяют анализировать и предсказывать их поведение. Они используются в таких областях, как автоматика, управление технологическими процессами, робототехника и другие. Хорошо известно, что поиск функции Ляпунова является «краеугольным камнем» математической теории устойчивости. Применение функций Ляпунова позволяет установить условия продолжимости решений для различных типов систем дифференциальных уравнений, включая линейные и нелинейные системы, системы с положительно определенной или неопределенной матрицей, системы с ограниченным или неограниченным числом переменных и т. д. Это делает функции Ляпунова ценным инструментом для исследования свойств системы дифференциальных уравнений, оценки устойчивости системы и определения ее поведения вблизи определенной точки.

Литература

1. Финогенко, И.А. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью / И.А. Финогенко. – Иркутск, 2013. – 82 с.
2. Общая теория систем обыкновенных дифференциальных уравнений : учебно-методическое пособие / Н.А. Бегун [и др.]. – СПб., 2022. – 55 с.
3. Заика, Ю.В. Дифференциальные уравнения : курс лекций / Ю.В. Заика. – Петрозаводск, 2012. – 215 с.
4. Труфанова, Т.В. Дифференциальные уравнения в примерах и задачах. Часть III. Системы дифференциальных уравнений и уравнения в частных производных 1-го порядка : учебно-методическое пособие / Т.В. Труфанова. – Благовещенск : Амурский гос. ун-т, 2002. – 59 с.

УДК 621.382.049.77

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ FLIP-CHIP В ПРОЦЕССЕ СБОРКИ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

Видрицкий А.Э.¹, Жамойть А.Е.¹, Ланин В.Л.²

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработан метод формирования контактных соединений между фотоприемной матрицей (ФПМ) и кремниевым мультиплексором (КМ) с использованием технологии перевернутого кристалла (*Flip-Chip*). В этом методе каждый фоточувствительный *p-n* переход ФПМ соединяется с соответствующей входной ячейкой КМ с помощью столбиков связи – бампов.

Ключевые слова: QWIP-датчик, фотоприемное устройство, диффузионная пайка, *Flip-Chip*, оплавление.

THE TECHNIQUE OF FORMING CONTACT CONNECTIONS BY THE FLIP-CHIP METHOD DURING THE ASSEMBLY OF PHOTODETECTORS

Vidritsky A.E.¹, Zhamoit A.E.¹, Lanin V.L.²

¹INTEGRAL JSC – Managing Company of INTEGRAL Holding

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

Abstract. A method has been developed for forming contact connections between a photodetector matrix (PDF) and a silicon multiplexer (SM) using flip-chip technology. In this method, each photosensitive pn junction of the FILM is connected to the corresponding input call of the CM using communication columns – bumps.

Key words: QWIP sensor, photodetector, diffusion soldering, Flip-Chip, reflow.

Адрес для переписки: Видрицкий А. Э., ул. Корженевского, 16, г. Минск, 220108, Республика Беларусь
e-mail: AVidritskiy@integral.by

Современная электроника активно развивается в направлении высокой скорости работы, большей плотности упаковки элементов, оптимизации размеров устройств и повышения их функциональности. 3D-интеграция позволяет производителям электроники увеличить функциональность каждого компонента, что соответствует современным тенденциям в развитии технологий. Это достигается за счет вертикальной интеграции электронных компонентов, что увеличивает плотность монтажа и позволяет более эффективно использовать площадь изделия. Применение этой технологии особенно актуально в производстве микропроцессоров и компонентов памяти, где высокая плотность монтажа и эффективное использование площади являются ключевыми факторами для повышения производительности и снижения энергопотребления.

Наиболее подходящая технология монтажа кристаллов соответствует следующим основным требованиям: малые размеры кристаллов, малый шаг выводов, высокая стойкость воздействию температурных, электрических и механических факторов [1].

Данные требования могут быть выполнены с помощью диффузионной пайки с переходным жидким этапом.

Современные инфракрасные фотоприемные устройства (ИК ФПУ) включают в себя кремниевый мультиплексор (КМ) и фотоприемную матрицу (ФПМ). Сборка осуществляется методом перевернутого кристалла (*Flip-Chip*), когда каждый

фоточувствительный *p-n*-переход ФПМ соединяется со своей входной ячейкой КМ через столбики связи – бампы. В качестве материала столбиков связи чаще всего применяют различные припои, а также индий благодаря его хорошей адгезии к контактными площадкам КМ и ФПМ и пластичности.

Процесс естественного окисления индия на поверхности бампов приводит к образованию оксидной пленки. При сжатии бампов во время сборки, когда происходит их совместная деформация, необходимо убедиться, что пленка разрушена. Бампы, сформированные с помощью фотолитографии, имеют большую площадь плоской контактной поверхности. Для начала их деформации требуется большое усилие [2]. Оксидная пленка должна разрушаться при деформации бампов и обеспечивать контакт чистого индия. Если пленки слишком толстые, их жесткость может мешать деформации бампа и соединению индия. Одно из решений этой проблемы – оплавление бампов, при котором удаляется оксидная пленка. После оплавления бампы приобретают сферическую форму, что облегчает их дальнейшую деформацию при монтаже и разрушение оксидной пленки [3].

Процесс соединения кристаллов был протестирован на монтажной станции *Fineplacer Sigma*. Максимальная сила прижатия кристалла на этой станции составляет 40 Н. Помимо совмещения и сжатия, монтажная станция *Fineplacer Sigma* также имеет встроенную функцию нагрева соединяемых кристаллов до 400 °С во время монтажа.

Первая попытка соединения кристаллов была проведена в следующих режимах:

- усилие сжатия: 40 Н;
- время приложения усилия: 3 мин;
- нагрев: 200 °С.

Температура пайки подбиралась с учетом температуры плавления индия (156,6 °С). Затем были собраны и проверены три образца. Проверка показала отсутствие электрического контакта.

Причиной отсутствия электрического контакта является слой оксида на бампах. Изучение разделенных кристаллов показало, что во время соединения все бампы ФПМ подверглись деформации. Образцы прошли испытание на разрыв. Прочность на разрыв, измеренная в направлении, перпендикулярном поверхности кристалла, составила 10 Н.

При осмотре разъединенных кристаллов было обнаружено, что сплавление бампов произошло не по всей площади. В некоторых местах пайка прошла качественно, в других произошла только деформация бампов (рисунок 1).

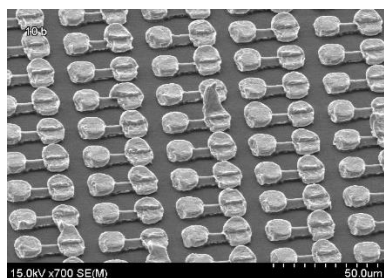


Рисунок 1 – Внешний вид формы столбиков связи после их разрыва

Оплавление бампов до полусферической формы и удаление оксидной пленки с их поверхности выполнено в малогабаритной вакуумной оплавительной печи *RSS-160-S* при подаче паров муравьиной кислоты при температуре 165 °С. На рисунке 2 показан внешний вид формы столбиков связи после обработки.

Бампы ФПМ обладают ровным профилем, их плавление не является необходимым. Тем не менее, чтобы уменьшить толщину оксидного слоя, кристаллы ФПП подвергнуты обработке в атмосфере муравьиной кислоты при температуре 135 °С в течение 10 минут.

Далее было проведено несколько экспериментов для определения оптимальных параметров и методики их соединения.

Наиболее подходящими параметрами являются следующие:

- сила сжатия: 40 Н;
- скорость увеличения нагрузки: 3 Ньютона в секунду;
- увеличение температуры кристаллов до 200 °С со скоростью 20 °С/с;
- время приложения усилия: 6 мин.

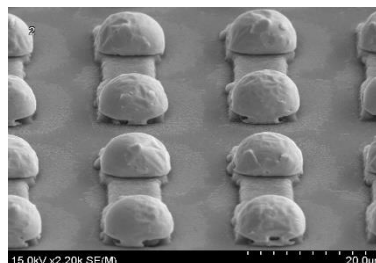


Рисунок 2 – Внешний вид формы столбиков связи после обработки

На рисунке 3 показан внешний вид столбиков связи после разрыва, среднее усилие на разрыв составляет 30 Н.

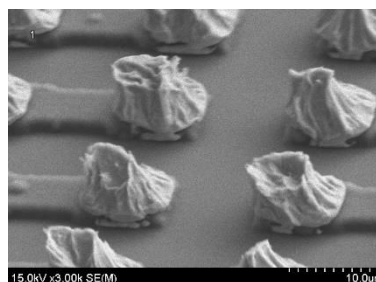


Рисунок 3 – Внешний вид столбиков связи после сплавления и разрыва

В результате замера электрических характеристик установлено, что сопротивление контактов находится в диапазоне 0,9–3 Ом.

Литература

1. Борисова, Ю. Особенности сборки изделий электроники по технологии 3D интеграции / Ю. Борисова // Технологии в электронной промышленности. 2016. – № 2. – С. 90–92.
2. Оплавленные индиевые столбы в технологии сборки ИК ФПУ / А. Р. Новоселов [и др.] // Прикладная физика. – 2010. – № 5. – С. 77–80.
3. Ли Н.Ч. Технология пайки оплавлением, поиск и устранение дефектов: поверхностный монтаж, BGA, CSP и Flip-Chip технологии / Н.Ч. Ли. – М. : Издательский дом «Технологии», 2006. – С. 270.

УДК 616-072.7

ПРИМЕНЕНИЕ БИОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В РЕАБИЛИТАЦИИ

Габец В.Л., Есьман, Г.А., Бондаренко В.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В данной работе было проведено исследование в области создания и применения медицинских аппаратов и приборов на основе биомеханической обратной связи, которая позволяет обеспечивать контроль, усиление либо ослабление физиологических показателей пациента, и дает возможность повысить лабильность механизмов регуляции.

Ключевые слова: биомеханическая обратная связь, биологическая обратная связь, медицинская приборы, датчики, реабилитация.

APPLICATION OF BIOMECHANICAL FEEDBACK IN REHABILITATION

Habets V., Yesman G., Bondarenko V.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. In this work, a study was conducted in the field of creation and use of medical devices and instruments based on biomechanical feedback, which allows for control, strengthening or weakening of the patient's physiological indicators, and makes it possible to increase the lability of regulatory mechanisms.

Key words: biomechanical feedback, biofeedback, medical equipment, sensors, rehabilitation.

*Адрес для переписки: Бондаренко В.А., ул. Сурганова 47/4-323, г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: vladka.bond7@gmail.com*

Использование интеллектуальных устройств и носимых технологий в повседневной жизни значительно возросло за последнее десятилетие. Это справедливо и в области спорта и физической реабилитации. В спорте профессиональные спортсмены и спортсмены-любители постоянно пытаются улучшить свои навыки и результаты, используя передовые технологии, что в конечном итоге может привести к конкурентному преимуществу. Аналогичным образом, при физической реабилитации пациенты используют технологии, позволяющие сократить процесс реабилитации и повысить его эффективность.

Одной из концепций, которая приводит к улучшению выполнения деятельности и производительности и, следовательно, к конкурентному преимуществу в спорте или улучшению процесса реабилитации, является **биомеханическая обратная связь (БОС)**. БОС – это метод лечения и контроля тела, в котором используются датчики для измерения физиологических и физических функций, параметров и движений тела человека, в том числе таких, которые не могут быть восприняты органами чувств человека. Данные датчиков обрабатываются, и результаты передаются человеку через одно из органов чувств. Человек пытается отреагировать на полученную информацию, чтобы изменить воспринимаемые функции, параметры и действия желаемым образом, замыкая тем самым петлю обратной связи.

Системы БОС обычно состоят как минимум из четырех основных элементов: пользователя, одного или нескольких датчиков, блока обработки и одного или нескольких исполнительных механизмов. Датчик(и) измеряют активность пользователя и

отправляют данные в процессор. Блок обработки анализирует данные и генерирует обратную связь, которая предоставляется пользователю через привод(ы). Пользователь реагирует на этот отзыв, исправляя или меняя свою деятельность [1].

Различные датчики, измеряющие физиологические или биомеханические параметры тела используются и изучаются в различных приложениях в спортивной и физической реабилитации. Выбор наиболее подходящих датчиков сильно зависит от измеряемых параметров и переменных, выполняемой деятельности и предполагаемого использования системы БОС.

Блок обработки получает сигналы и данные от датчиков и обрабатывает их. Тип и работа процессора зависят от требований системы к обработке. Датчик и блок обработки могут быть интегрированы в одно и то же устройство или могут быть реализованы как два отдельных устройства. В последнем случае они обычно подключаются беспроводным способом, но в некоторых используется и проводное соединение. В настоящее время нет необходимости в устройствах с высокой вычислительной мощностью, и, в целом, вычислительная мощность не является проблемой при разработке приложений, поскольку микроконтроллеры и персональные компьютеры могут выполнять практически все необходимые задачи [2].

Информация обратной связи должна быть значимой и понятной пользователю. Ее передача осуществляется в различных модальностях, определяемых стимуляцией чувств человека: слуховых для звука, визуальных для зрения, вибротактильных или тактильных для осязания.

Система биологической обратной связи общается с пользователем, предоставляя информацию с помощью различных исполнительных механизмов, таких как визуальные дисплеи, наушники или динамики, вибрирующие браслеты или очки дополненной реальности. Очень важно использовать правильный тип модальности: информация обратной связи не должна мешать модальностям, используемым для выполнения действия, и не должна налагать слишком большую дополнительную когнитивную нагрузку. Тем не менее, разные модальности могут использоваться одновременно или в одном приложении, но только при соблюдении условий, упомянутых выше.

Разработка систем БОС ориентирована на физическую активность, а все, что касается технических компонентов, руководствуется принципом, что используемое оборудование не должно препятствовать движению человека. Если это так, то системы БОС могут принести пользу и быть полезными для пользователя, в противном случае они могут иметь противоположные эффекты. Технологии датчиков, связи и исполнительных механизмов должны работать в желаемой среде; оборудование для занятий плаванием должно отличаться от того, которое используется для реабилитации походки или бега. Однако исследования как ходьбы, так и бега могут использовать аналогичную или одну и ту же систему для оценки двух разных движений.

Тот же набор датчиков часто используется для тренировки баланса. Расширенное использование кинематического датчика продемонстрировано в танцевальном приложении, где сложные движения фиксируются и используются в качестве входных данных для слуховой обратной связи. Датчики в виде умной одежды и текстиля вероятно, будут очень интересны для исследований БОС в будущем. Есть примеры датчиков, которые можно использовать для оценки активности всего тела, и в будущем они превратятся в умные ткани, использующие оптические волокна и датчики деформации для определения движения.

Общая тенденция в этой области направлена на использование носимых датчиков и интеллектуального спортивного оборудования. Размещение носимых датчиков имеет первостепенное значение, поскольку только датчик, размещенный в правильном месте на теле или оборудовании, способен обнаружить желаемое движение, которое, однако, зависит от конкретного применения и не может быть обобщено.

Также стоит отметить, что в большинстве работ используется частота дискретизации около 100 Гц.

Эта частота подходит для регистрации большинства моделей движений человека. Хотя некоторые конкретные движения или события, такие как удары, требуют более высоких частот дискретизации и, вместе с тем, более мощного оборудования. Частота дискретизации также связана с используемой полосой пропускания связи. То есть, если устройства не могут обмениваться данными быстрее и ограничены в передаче данных, частоту дискретизации можно уменьшить, чтобы компенсировать ограничения аппаратного обеспечения [2].

Необходимы дальнейшие исследования влияния модальностей в разных ситуациях. После того как движение зафиксировано и обработано, соответствующая информация о движении возвращается пользователю посредством определенной модальности. Этого можно добиться разными способами. В начале разработки системы БОС исследователи должны решить, какую информацию они хотят донести до пользователя и как они хотят этого добиться. Сложность и представление информации обратной связи могут значительно различаться в зависимости от модальности.

В большинстве случаев используется визуальная обратная связь, что неудивительно, ведь зрение – основное чувство человека. Визуальная информация может быть представлена на дисплее и в большинстве случаев не требует пояснений для пользователей и требует минимального обучения. С другой стороны, слуховая и тактильная обратная связь требуют определенного обучения перед использованием. Визуальную обратную связь можно обеспечить преимущественно во время стационарных упражнений в спортивной тренировке или реабилитации.

Одним из способов сделать визуальную обратную связь полезной в портативных приложениях является использование дополненной реальности. Также заслуживают изучения некоторые элементарные исследования с использованием дополненной реальности и виртуальной реальности с головными дисплеями, хотя в будущем в этой области потребуются дополнительные исследования.

Литература

1. Real-Time Biomechanical Feedback Systems in Sport and Rehabilitation [Electronic resource]. – Mode of access: <https://encyclopedia.pub/entry/25041>. – Date of access: 24.09.2023.
2. Oonagh M Giggins, Ulrik McCarthy Persson, Brian Caulfield, Biofeedback in rehabilitation [Electronic resource]. – Mode of access: <https://jneuroengrehab.biomedcentral.com/articles/10.1186/1743-0003-10-60>. – Date of access: 25.09.2023

УДК 666.653

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО
МАНГАНИТА ЛАНТАНАБука А.В.¹, Дятлова Е.М.¹, Попов Р.Ю.¹, Гундилович Н.Н.¹, Колонтаева Т.В.²¹Белорусский государственный технологический университет²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Методом высокотемпературного спекания получены материалы на основе модифицированного манганита лантана, изучены основные диэлектрические свойства (диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь); установлены зависимости состав-свойство полученных материалов.

Ключевые слова: манганит лантана, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, ионы-модификаторы.

DIELECTRIC PROPERTIES OF CERAMICS BASED ON MODIFIED
LANTHANUM MANGANITEBuka A.¹, Dyatlova E.¹, Popov R.¹, Hundzilovich N.¹, Kolontaeva T.²¹Belarusian State Technological University²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Materials based on modified lanthanum manganite were obtained by high-temperature sintering, the main dielectric properties (permittivity, tangent of the dielectric loss angle) were studied; the composition-property dependences of the obtained materials were established.

Key words: lanthanum manganite, permittivity, dielectric loss angle tangent, modifier ions.

Адрес для переписки: Колонтаева Т.В., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by

Целью данного исследования является синтез и исследование диэлектрических свойств (диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь) керамики на основе модифицированного манганита лантана и установление зависимости указанных свойств от вида и содержания иона-модификатора. Данные материалы применяются в качестве датчиков и сенсоров магнитных полей, твердотопливных элементов питания, катализаторов доокисления, устройств спинтроники, а также для считывающих головок устройств памяти.

Для синтеза керамики на основе манганита лантана выбраны соединения ионов-модификаторов квалификации ХЧ: оксид лантана; оксид марганца (III) оксид церия (III), карбонат неодима, карбонат самария, оксид гольмия и оксид эрбия. Данные соединения относятся к ряду лантаноидов, они имеют близкое сродство к иону лантана. В табл. 1 приведены значения радиусов ионов РЗЭ.

Таблица 1. Значения радиусов ионов РЗЭ

Элемент	Радиус иона, пм
Ce ³⁺	103,4
La ³⁺	101,6
Nd ³⁺	99,5
Sm ³⁺	96,4
Ho ³⁺	89,4
Er ³⁺	88,1

Как видно из таблицы 1 радиус иона уменьшается с возрастанием атомного номера в периодической таблице, за исключением иона

церия (III) что связано с его электронной конфигурацией, т. к. Се имеет несколько степеней окисления. Ионы-модификаторы подбирались согласно ионным радиусам элементам для полного согласования с правилами Полинга.

Синтез керамики заключался в предварительном смешивании и сухом помоле исходных компонентов в стехиометричном соотношении с добавлением соединений ионов-модификаторов в количестве от 0 до 2 с шагом 0,5 мол. %. При расчете было учтено разложение карбонатных составляющих. Минерализаторы вводились вместо оксида лантана, чтобы беспрепятственно встраиваться в структуру манганита лантана. После помола смесь обжигалась в электрической печи при температуре 1300 °С с выдержкой при максимальной температуре 2 ч. Затем спек повторно измельчался в микрошаровой мельнице, далее происходило формование образцов диаметром 6 мм и толщиной 2 мм, в качестве связующего применялся ПВС, давление прессования составляло 50 МПа. Прессование осуществлялось двухступенчатым методом для недопущения запрессовки воздуха внутрь материала. Образцы повторно обжигались в печи согласно заданному температурно-временному режиму, описанному выше. Образцы механически обрабатывались от «заусениц» и полировались. На опытные образцы наносился графит для улучшения контакта между поверхностью диска и измерительным устройством.

Рентгенофазовым анализом было подтверждено наличие основных характеристических

максимумов для соединения LaMnO_3 ($d = 2,84; 2,76$ и $1,98 \text{ \AA}$). Состав керамики является практически монофазным, в небольшом количестве присутствуют примесные фазы нестехиометричного состава: $\text{LaMnO}_{3,15}$ и $\text{LaMnO}_{3,08}$. С увеличением содержания иона-модификатора растет содержание стехиометричной фазы LaMnO_3 .

Диэлектрическая проницаемость (ϵ) и тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) измерялись с помощью измерителя иммитанса Е7-23 при частоте 100 Гц. Диэлектрическая проницаемость для материалов, содержащих следующие ионы-модификаторы, составляет: церий от 364 до 650; неодим от 368 до 1111; самарий от 325 до 1199; гольмий от 344 до 1120; эрбий от 386 до 1311. ϵ при 100 Гц, для немодифицированного манганита лантана, составляет 96. С добавлением 0,5 мол. % ионов-модификаторов происходит рост диэлектрической проницаемости более, чем в 3 раза, вероятно это связано с деформацией перовскитовой кристаллической решетки, появляются нескомпенсированные заряды, которые вносят вклад в поляризацию и соответственно в диэлектрическую проницаемость. С увеличением содержания ионов-модификаторов происходит монотонный рост диэлектрической проницаемости, т. к. происходит большее замещение ионов лантана на ионы РЗЭ. Однако присутствуют критическая точка 1,5 мол. %, при которой наблюдается значительный рост ϵ , вероятно данное явление связано с эффектом Максвелла-Вагнера (который основан на значительном различии основных электрофизических характеристик компонентов), при этом возникает нескомпенсированный заряд, который образуется на границах раздела зерен керамики.

Тангенс угла диэлектрических потерь при 100 Гц для составов, содержащих следующие минерализаторы, составляет: церий от 0,069 до 0,084; неодим от 0,034 до 0,074; самарий от 0,032 до 0,069; гольмий от 0,027 до 0,065; эрбий от 0,02 до 0,072; у немодифицированного LaMnO_3 потери составляют 0,083. С увеличением содержания иона-модификатора и уменьшением радиуса иона снижается значение тангенса угла диэлектрических потерь, вероятно это связано с размером иона и его электротранспортными способностями, например ион церия (3+) имеет наибольший ионный радиус и наибольшие потери, в то время как ион эрбия является наименьшим по размеру и меньшие потери, радиус иона также влияет на упаковку кристаллической решетки конечного соединения.

На рисунке 1 изображены оптические снимки при 100-кратном увеличении тонкого шлифа образцов, содержащих 2 мол. % эрбия (а) и церия (б).

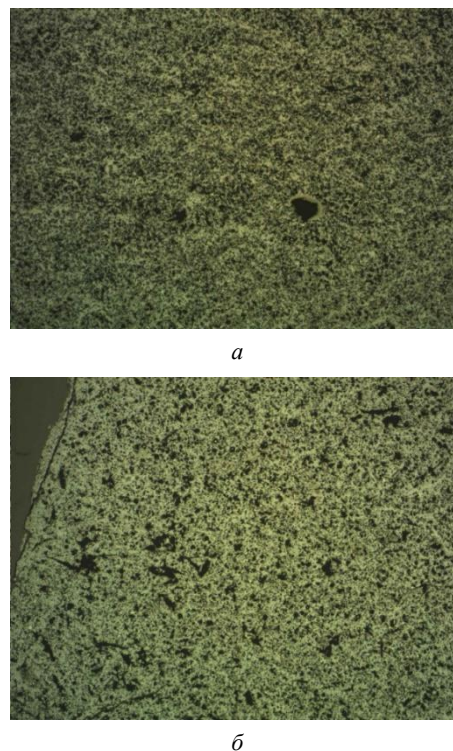


Рисунок 1 – Оптические снимки тонкого шлифа образцов, содержащих 2 мол. %: а – эрбия, б – церия

На изображениях видно, что структура полученных образцов является микропористой, однородной. Пористость – в основном закрытая, которая недоступна для прохождения влаги и газов. Также присутствуют крупные поры, вероятно образовавшиеся в процессе формования или обжига.

В данной работе исследовано влияние небольших добавок оксидов ионов-модификаторов лантаноидной подгруппы на основные диэлектрические свойства материалов. С уменьшением радиуса иона-минерализатора растут значения диэлектрической проницаемости что связано с их разной способностью (согласно правилам Полинга) искажать перовскитовую структуру и индуцировать свободные электрические заряды, тем самым изменяя диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь.

Керамические материалы на основе модифицированного манганита лантана могут быть рекомендованы для производства магнитных сенсоров и датчиков магнитных полей, датчиков Холла, устройств и изделий спинтроники, в качестве катодов в твердопливных элементах питания и электролизеров, каталитических элементов, а также магнитных головок для устройств чтения и записи информации.

УДК 666. 76:54.057

**КЕРАМИКА ДЛЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДАТЧИКОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА
Таратын И.А.¹, Колонтаева Т.В.¹, Дятлова Е.М.², Хорт А.А.², Бука А.В.²**

¹Белорусский национальный технический университет

²Белорусский государственный технологический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработаны и получены новые материалы на основе модифицированного титаната бария с заданным комплексом электрофизических и эксплуатационных свойств для чувствительных элементов датчиков диоксида углерода.

Ключевые слова: сегнетокерамика, титанат бария, высокотемпературное спекание, осаждение.

CERAMICS FOR SENSITIVE ELEMENTS OF CARBON DIOXIDE SENSORS

Taratyn I.¹, Kolontaeva T.¹, Dyatlova E.², Khort A.², Buka A.²

¹Belarusian National Technical University

²Belarusian State Technological University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. New materials based on modified barium titanate with a given set of electrophysical and operational properties for sensitive elements of carbon dioxide sensors have been developed and obtained.

Key words: ferroceramics, barium titanate, high-temperature sintering, precipitation.

Адрес для переписки: Колонтаева Т.В., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by

В настоящее время требуется постоянный контроль содержания углекислого газа в различных сферах деятельности человека (рабочее пространство, окружающая среда и др.). Усиленный контроль за концентрацией CO₂ осуществляется в выбросах предприятий. К газовым сенсорам предъявляется ряд требований, таких как высокая чувствительность, быстродействие, надежность. Полупроводниковые керамические материалы на основе модифицированного титаната бария обладают необходимым комплексом физико-технических и электрофизических характеристик, которые позволяют использовать материал для создания датчиков углекислого газа.

Целью данного исследования является разработка составов и технологии синтеза керамики для чувствительных элементов датчиков CO₂.

Для синтеза сегнетокерамики, методом высокотемпературного спекания (ВС), на основе модифицированного титаната бария применялись следующие материалы квалификации ХЧ: ВаСО₃, ТiО₂, СuО и La₂O₃ в количестве ВаТiО₃ к СuО 1:1 и сверх 100 мас. % вводилось 1, 3, 5 мас. % оксида лантана. Исходная смесь в заданном соотношении подвергалась совместному сухому помолу в микрошаровой мельнице, затем шихта спекалась при температуре 1250 °С с выдержкой при максимальной температуре 2 ч. После обжига материал подвергался повторному измельчению в шаровой мельнице.

Для синтеза керамики методом химического осаждения (ХО) использовались хлориды квалификации ЧДА: бария, титана, меди и лантана. В качестве растворителя применялись дистиллированная вода и этиловый спирт, в роли осадителя использовалась щавелевая кислота. Для получения

модифицированного титаната бария вначале были приготовлены водные растворы хлоридов исходных компонентов с концентрациями, обеспечивающими полную стехиометрию протекания синтеза. Также подготовлен раствор щавелевой кислоты в 50%-ном избытке по отношению к необходимому для полного осаждения компонентов конечного раствора. Раствор хлорида титана подавался в водно-спиртовой раствор при постоянном перемешивании, затем в полученный раствор добавлялись другие компоненты, а также спирт, необходимый для сохранения прежнего соотношения вода/спирт. После смешивания исходных компонентов добавлялся раствор щавелевой кислоты, полученная суспензия подвергалась фильтрации и промывке раствором аммиачной и дистиллированной воды до получения нейтральной или слабощелочной среды. Осадок подвергался сушке и прокаливанию при температуре 900 °С с выдержкой при максимальной температуре 1 ч.

Из полученных керамических порошковготавливалась водная суспензия, которая наносилась на кристалл анодированного алюминия с платиновыми электродами, затем происходило вжигание в электрической печи при температуре 850 °С в течении 5 ч. После отжига кристалл подвергался монтажу в корпус сенсора.

Результаты рентгенофазового анализа подтверждено, что немодифицированный ВаТiО₃, полученный методом высокотемпературного спекания, является монофазным. Экстремум дифракционного максимума находится при 2θ = 32 и 45°. С введением оксида меди (II) наблюдается снижение интенсивности основного рефлекса титаната бария, также происходит расщепление пика при 45°, что свидетельствует об увеличении степени

тетрагональности перовскитовой кристаллической решетки, имеются рефлексы, связанные со свободным (непрореагировавшим) оксидом меди (II). Введение оксида лантана способствует кристаллизации новой фазы с формулой $\text{BaO}_{0,95}\text{CuO}_{0,05}\text{La}_{0,05}\text{TiO}_3$, которая обладает меньшей степенью тетрагональности перовскитовой структуры, также происходит увеличение рефлексов в области $2\theta = 32$ и 45° и снижение расщепления рефлексов при $2\theta = 45^\circ$. При синтезе методом химического осаждения рентгенофазовый анализ показал, что основной фазой является $\text{BaO}_{0,95}\text{CuO}_{0,05}\text{La}_{0,05}\text{TiO}_3$, также присутствуют максимумы, относящиеся к свободному CuO . С помощью электронной микроскопии оценена микроструктура полученных материалов. Керамика, полученная методом химического осаждения из растворов, характеризуется большей дисперсностью и однородностью, чем материал, полученный методом (BC), это обусловлено способом синтеза, т. к. при и осаждении применяются высокодисперсные и более однородные по составу прекурсоры. Метод химического осаждения способствует получению материала с более высокими эксплуатационными характеристиками. На рисунке 1 изображена микроструктура, полученная методом электронной микроскопии, модифицированного $\text{BaTiO}_3 + \text{CuO}$ (1:1) с добавлением 5 мас. % оксида лантана.



a



б

Рисунок 1 – Электронные снимки модифицированного $\text{BaTiO}_3 + \text{CuO}$ (1:1), дополнительно содержащий 5 мас. % La_2O_3 ((a) – метод (BC); (б) – метод (XO))

Проведено исследование по изучению удельного объемного электрического сопротивления керамики в зависимости от частоты измерения.

Немодифицированный BaTiO_3 , полученный двумя методами характеризовался удельным электрическим сопротивлением равным $12 \cdot 10^9$ Ом·м при частоте 25 Гц. С увеличением частоты тока (1 кГц) сопротивление стало снижаться и составило 11 (BC) и $10 \cdot 10^9$ Ом·м (XO), при 50 кГц $\rho_v = 4,5$ и $3,8 \cdot 10^9$ Ом·м соответственно. Уменьшение сопротивления с увеличением частоты тока связано с трудностью поляризации материала, диполи не успевают переориентироваться в пространстве, тем самым не вносят значительный вклад в электрическое сопротивление материала. С увеличением содержания оксида лантана в керамике наблюдается снижение значений удельного объемного электрического сопротивления, это связано с тем, что La_2O_3 приводит к изменению электронной структуры керамики. Синтезированный керамический материал в системе $\text{BaTiO}_3\text{--CuO--La}_2\text{O}_3$ обладает искаженной перовскитовой структурой, т. к. в решетке происходит замещение ионов титаната бария ионами меди и лантана, при замещении бария лантаном образуется валентный электрон. Для компенсации ион Ti^{4+} переходит в Ti^{3+} . Таким образом в связи с данными переходами уменьшается электрическое сопротивление материала, за счет подвижных электронов, которые легко перемещаются под действием электрического поля. CuO образует тонкий поверхностный слой на зернах BaTiO_3 . Данные материалы имеют разные типы проводимости (p и n соответственно), сочетание вышеуказанных факторов приводит к возникновению энергетических уровней вблизи поверхности раздела фаз п.п./газ, что способствует улучшению сенсорных свойств и эксплуатационных характеристик материала.

В ходе работы было установлено, что датчики, полученные на основе модифицированного титаната бария, обладают повышенной чувствительностью, малым временем детектирования и релаксации. Эксплуатационные характеристики газового сенсора CO_2 с чувствительным элементом из разработанного керамического материала: коэффициент чувствительности к углекислому газу 1,25–1,29; коэффициент чувствительности к CO 1–0,7; время детектирования составляет от 40 до 60 с; время релаксации 90–120 с; рабочая температура 20–25 °С.

На основе полученных данных можно сделать вывод о том, что чувствительные элементы газовых CO_2 на основе модифицированного BaTiO_3 (ионы-модификаторы – Cu^{2+} и La^{3+}), обладают повышенной чувствительностью, сниженным временем детектирования и релаксации, а также являются достаточно стабильными.

УДК 620.179.14

ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ ОБРАЗЦОВ НА ВЕЛИЧИНУ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ ПОСЛЕ ИМПУЛЬСНОГО НАМАГНИЧИВАНИЯ НАКЛАДНЫМ ДАТЧИКОМ

Бурак В.А.^{1,2}, Коваленок И.А.², Протасевич А.С.²

¹ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной работе рассмотрено влияние на величину остаточной намагниченности длины образцов из инструментальных углеродистых марок сталей и расположения импульсного намагничивания и датчика на поверхности цилиндрического образца. Установлено, что для стали, закаленной от температуры выше рекомендуемой, при расположении датчика на торце образца, существует значение длины, при повышении которой величина градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности стабилизируется. Были даны практические рекомендации по определению оптимального положения датчика на поверхности цилиндрического образца с целью повышения надежности и достоверности импульсного магнитного неразрушающего контроля.

Ключевые слова: магнитный неразрушающий контроль, импульсное намагничивание, инструментальная сталь, длина образцов.

THE INFLUENCE OF SAMPLE LENGTH ON THE RESIDUAL MAGNETIZATION AFTER PULSE MAGNETIZATION WITH AN ATTACHED SENSOR

Burak V.A.^{1,2}, Kovalenok I.A.², Protasevich A.S.²

¹Institute of Applied Physics of NAS of Belarus

²Belarussian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. This work is considered the effect on the value of residual magnetization of the length of samples made of tool carbon steel and the location of pulse magnetization and a sensor on the surface of a cylindrical sample on the value of residual magnetization. It has been established that for steel hardened at a temperature higher than recommended one, when the sensor is located at the end of the sample, there is a length value increasing of which results to stabilization of the magnitude of the gradient of the normal component of the residual magnetization field strength. Practical recommendations were given for determining the optimal position of the sensor on the surface of a cylindrical sample in order to increase the reliability of pulsed magnetic non-destructive testing.

Key words: magnetic non-destructive testing, pulse magnetization, instrumental steel, length of articles.

Адрес для переписки: Бурак В.А. ул. Академическая 16, г Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: veronika.burak@gmail.com

Неразрушающий магнитный контроль ферромагнитных материалов и изделий из них основан на поиске корреляционных зависимостей между показателями, описывающими структурное состояние контролируемого объекта и магнитными величинами, характеризующими, например, остаточную намагниченность. Так как в магнитном контроле информация о структуре металла формируется не точно, а по некоторому объему, который имеет размытые границы, зависящие от величины и характера намагничивающего поля, то особое внимание при анализе корреляционных зависимостей, лежащих в основе различных способов магнитного неразрушающего метода контроля, следует уделить правильному выбору расположения пятна намагничивания, особенно на образцах, для которых характерны относительно небольшие геометрические размеры.

Для оценки влияния конечных размеров и формы намагничиваемых ферромагнитных образцов для целей магнитного неразрушающего контроля широко используются расчетные

методы [1], основанные на определении размагничивающего фактора. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию влияния длины образцов из двух марок сталей одного класса на величину остаточной намагниченности после импульсного намагничивания накладным датчиком.

Ранее была дана оценка, как длина образцов выбранных марок сталей влияет на параметры вторичного магнитного поля при намагничивании в проходном датчике [2].

Намагничивание осуществлялось импульсным магнитным полем напряженностью $H = 250$ кА/м с помощью накладного датчика прибора ИМА-6 [3], величина градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности фиксировалась также датчиком прибора ИМА-6.

Были рассмотрены образцы закаленных инструментальных углеродистых сталей У8А и У10А цилиндрической формы диаметром 10 мм и различной длины. Длины образцов: 10, 20, 30, 50,

70 и 100 мм. Температура закалки образцов из стали У8А составляла 700 °С, а образцов из стали У10А – 950 °С. Для стали У8А температура закалки была ниже рекомендованной ГОСТ, для стали У10А – выше, что позволяет говорить о том, что одна из сталей была магнитомягкой по отношению к требуемой структуре, а другая – магнитотвердой.

Датчик прибора ИМА-6 при намагничивании и измерении величины градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности располагался на торце цилиндрического образца (кривые 1 на рисунках 1 и 2) и посередине образующей боковой поверхности (кривые 2 на рисунках 1 и 2).

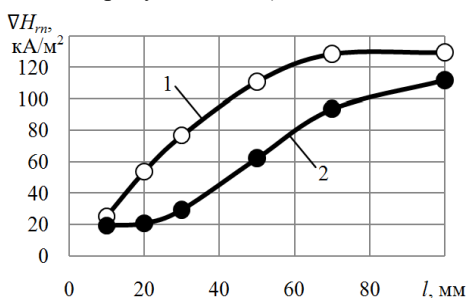


Рисунок 1 – Зависимость градиента от длины для образцов из стали У10А, $T_{\text{зак}} = 950$ °С

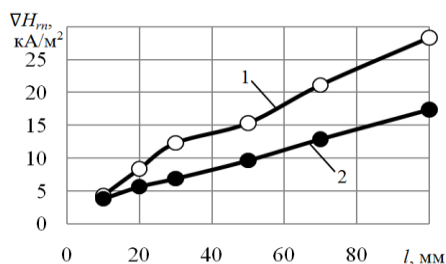


Рисунок 2 – Зависимость градиента от длины для образцов из стали У8А, $T_{\text{зак}} = 700$ °С

Как видно из рисунков, для цилиндрических образцов из стали У10А и У8А характерно увеличение фиксируемого значения градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности. Также для образцов из обеих рассматриваемых марок сталей величина градиента остаточной намагниченности для варианта расположения датчика на торце цилиндрического образца больше, чем при радиальном расположении датчика относительно контролируемого образца.

Для образцов стали У8А наблюдается равномерный рост измеряемого информативного пара-

метра как для положения датчика на торце образца, так и на образующей, разница между значениями градиента возрастает равномерно с увеличением длины образцов.

Для образцов из инструментальной стали У10А зависимость величины градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности более сложная: для положения датчика на торце образца с увеличением длины образца стабилизируется и для образцов длиной 100 мм и 70 мм практически не изменяется. При положении датчика на образующей цилиндрической поверхности наблюдается тенденция к стабилизации значений. Также при большой (100 мм) длине разница между измеренными при положении датчика в разных частях образца значениями градиента поля остаточной намагниченности различаются незначительно.

Таким образом, для получения максимальной чувствительности и надежности магнитного контроля, датчик рекомендуется располагать на торце цилиндрического образца, чтобы оценка величины остаточной намагниченности велась с объема, ограниченного симметричными поверхностями. Для стальных образцов, закаленных от температур, выше рекомендуемых стандартами, длина образца на величину оценки остаточного поля влияет до некоторого значения длины, что также положительно влияет на качество измерений.

Однако, для образцов имеющих геометрические размеры, одинаковые во всех направлениях, для получения стабильных результатов измерения величины градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности положение датчика относительно измеряемого образца не оказывает значительного влияния.

Литература

1. Сандомирский, С.Г. Расчет и анализ размагничивающего фактора ферромагнитных тел / С.Г. Сандомирский / Нац. акад. наук Беларуси, Объед. ин-т машиностроения. – Минск : Беларуская навука, 2015. – 243 с.
2. Короткевич, З.М. Влияние длины образцов на вторичное магнитное поле при импульсном намагничивании в проходном датчике / З.М. Короткевич, В.А. Бурак // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: Материалы международной научно-технической конференции, Могилев, 21–22 апреля 2022 г. / Бел. Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2022. – С. 317–318.
3. Импульсный магнитный анализатор ИМА-6 / В.Ф. Матюк [и др.] // Дефектоскопия. – 2009. – № 7. – С. 62–74.

УДК 538.958

**SILICON HYPERDOPED WITH SELENIUM FOR BROAD BAND INFRARED
PHOTODETECTORS AND SOLAR CELLS**

**Komarov F.¹, Parkhomenko I.², Wang Ting², Milchanin O.¹, Zhussupbekov K.³, Zhussupbekova A.³,
Wendler E.⁴**

¹*A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University*

²*Belarusian State University*

Minsk, Republic of Belarus

³*Trinity College Dublin*

Dublin, Ireland

⁴*Friedrich-Schiller-Universität Jena*

Jena, Germany

Abstract. In this work, we present the formation of silicon layers hyperdoped with selenium through Se implantation followed by pulsed laser annealing. The concentration depth distribution of Se atoms was investigated by Rutherford backscattering. The crystallinity of the doped silicon layer and the fraction of Se atoms in Si lattice sites were determined using backscattering yield analysis. Experimental and theoretical sub-band properties were compared and discussed. Notably, a significant increase in light absorption across a wide spectral region (0.2–23.0 μm) was observed, demonstrating the potential of selenium hyperdoping for enhancing infrared absorption in silicon.

Key words: silicon, hyperdoping, selenium implantation, laser annealing, impurity sub-band.

**СЛОИ КРЕМНИЯ, ГИПЕРДОПИРОВАННЫЕ СЕЛЕНОМ, ДЛЯ ШИРОКОДИАПАЗОННЫХ
ИК-ФОТОДЕТЕКТОРОВ И СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ**

**Комаров Ф.Ф.¹, Пархоменко И.Н.², Ван Тин², Мильчанин О.В.¹, Жусупбеков К.³, Жусупбекова А.³,
Вендлер Э.⁴**

¹*Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ*

²*Белорусский государственный университет*

Минск, Республика Беларусь

³*Тринити-колледж*

Дублин, Ирландия

⁴*Йенский университет имени Фридриха Шиллера*

Йена, Германия

Аннотация. В этой работе мы представляем формирование слоев кремния, гипердопированных селеном, путем имплантации Se с последующим импульсным лазерным отжигом. Распределение концентрации атомов Se по глубине было исследовано методом обратного Резерфордского рассеяния. Кристалличность легированного слоя кремния и доля атомов Se в узлах решетки Si были определены с помощью анализа выхода рассеянных ионов гелия в режиме каналирования их. Были сравнены и обсуждены экспериментальные и теоретические характеристики подзоны в запрещенной зоне Si. Примечательно, что наблюдалось значительное увеличение поглощения света в широкой области спектра (0,2–23,0 мкм), демонстрирующее потенциал гипердопирования селеном для усиления поглощения инфракрасного излучения кремнием.

Ключевые слова: кремний, гипердопирование, имплантация селена, лазерный отжиг, примесная подзона.

Адрес для переписки: Комаров Ф.Ф., ул. Курчатова, 7, г. Минск, 220045, Республика Беларусь

e-mail: Komarovf@bsu.by

Introduction. In recent years, number of the world's leading micro- and optoelectronic laboratories have been working to develop high performance photodetectors and light emitting devices in the near (NIR) and mid-IR(MIR) regions, silicon waveguides and modulators whose fabrication will allow electronic and optoelectronic devices to be integrated in a single integrated circuit. But due to the large band gap of silicon (1.12 eV), for the wavelength longer than 1.1 μm, optical and electrical performance of silicon drops sharply. Extending the sensitivity of silicon-based and silicon technology-compatible photodetectors and solar cells to the IR range is therefore an active area of research.

It has been established that the highest absorption coefficient ($\sim 10^4 \text{ cm}^{-1}$) in the IR spectral range (up to $\sim 3 \text{ μm}$) is registered for single-crystalline silicon hyperdoped with chalcogen atoms (S, Se, Te). The equilibrium chalcogen solubility in silicon is $\sim 10^{16} - 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. If the impurity concentration exceeds the equilibrium solubility limit by 3–4 orders of magnitude, the impurity levels form an impurity sub-band. Then, photon absorption through electron transitions "valence band – impurity sub-band" and "impurity sub-band – conduction band" becomes possible. Impurity doping level higher than the equilibrium threshold can be achieved by non-equilibrium

techniques such as ion implantation followed by femto-, pico-, and nanosecond laser pulses.

Experimental. Silicon (111) *p*-type double-side polished wafers were implanted with 140 keV $^{80}\text{Se}^+$ ions to the fluences of $3.1 \cdot 10^{15}$ (Se (0.75 %)/Si) and $6.1 \cdot 10^{15}$ (Se (1.5 %)/Si) ions/cm². Pulsed laser irradiation of the implanted samples was initiated by a ruby laser pulse ($\lambda = 694$ nm, FWHM = 70 ns) with a uniform pulse energy distribution along the area with a diameter of 4 mm. The energy density W in the laser pulse was set as 2 J/cm². Se concentration depth distribution profiles, fraction of impurities at lattice sites and Si crystallinity of the implanted and annealed samples were analyzed by Rutherford backscattering spectroscopy in combination with the channeling technique (RBS/C) using 1.4 MeV He⁺ ions. The optical properties in the NIR spectral range were investigated through measurements of the transmittance and specular reflectance spectra using the Lambda 1050 UV/Vis/NIR spectrometer. The specular reflectance spectra were measured at an 8° incident angle using a Universal Reflectance Accessory with an accuracy of 0.1 %. The optical properties in the MIR range were studied by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) in the transmittance and reflectance mode using a Perkin Elmer Spectrum 3 Optical FTIR spectrophotometer.

Results and discussion. Pulsed laser melting leads to a considerable redistribution of the implanted impurity toward the surface and into the bulk ($200\text{--}250$ nm) with the formation of a decreasing plateau with the average Se concentration nearly $7.5 \cdot 10^{19}\text{--}1.0 \cdot 10^{20}$ cm⁻³ and $1.1 \cdot 10^{20}\text{--}1.5 \cdot 10^{20}$ cm⁻³ for the ion fluences of $3.1 \cdot 10^{15}$ and $6.1 \cdot 10^{15}$ ions/cm², respectively and accumulation of impurity in the near-surface layer of around 10–20 nm thickness. As a result, a thin layer of accumulated selenium (~1–3 % of the total number of implanted atoms) formed in the near-surface region of the Si sample (Figure 1).

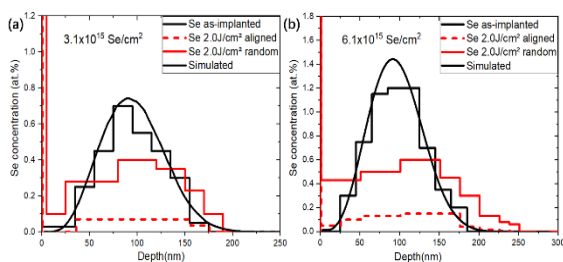


Figure 1 – Depth distribution of Se concentration measured in random and channeling regimes on the samples implanted with the fluence of $3.1 \cdot 10^{15}$ cm⁻² (a) and $6.1 \cdot 10^{15}$ cm⁻² (b)

The degree of crystallinity f_{cr} of the laser annealed layer was calculated by the formula from Ref. [1]:

$$f_{cr} = \frac{1 - \chi_{Si}}{1 - \chi_{min}} \quad (1)$$

$$f_{cr} = \frac{1 - \chi_{Se}}{1 - \chi_{min}} \quad (2)$$

Table 1. The degree of crystallinity of silicon layer (f_{cr}) and the fraction of impurity at lattice sites after implantation of selenium ions and laser annealing $W = 2$ J/cm²

Se ion fluence (cm ⁻²)	$f_{cr} = \frac{1 - \chi_{Si}}{1 - \chi_{min}}$, %	Se yield in random case (Se/cm ²)	Se yield in aligned case (Se/cm ²)	Se fraction in the lattice sites, %
$3.1 \cdot 10^{15}$	93.6	$3.05 \cdot 10^{15}$	$0.86 \cdot 10^{15}$	72.0
$6.1 \cdot 10^{15}$	91.9	$5.46 \cdot 10^{15}$	$1.66 \cdot 10^{15}$	69.6

For the used ion fluences, the lattice incorporation given in Table 1 is relatively low and stems from the trailing edge of the profiles. This suggests some incorporation of Se at the interface area between the implanted layer and underlying crystalline substrate as well as a higher incorporation of Se atoms at the Si lattice sites in the near-surface region. The sensitivity of the RBS method is about 0.01 at. %. The energy density of $W = 2$ J/cm² was found to be optimal in terms of achieving structural perfection (greater than 91 %) and maximizing the concentration of Se at lattice sites (greater than 69 %).

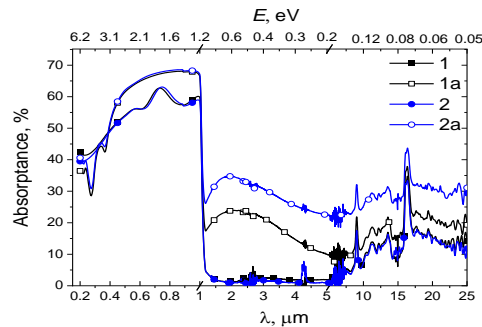


Figure 2 – Absorbance spectra of samples with the Se concentration of 0.75 % (1, 1a) and 1.5 % (2, 2a): before (1, 2) and after PLA (1a, 2a).

Conclusion. The obtained NIR and MIR absorbance spectra (Figure 2) indicate the formation of a sub-band in silicon. The PLA results in an increase of absorption by about 15–17 times in the NIR range. These data also show the increase of absorption after PLA in the MIR range. This indicates the existence of transitions between the formed sub-band and the conduction band of silicon. Before annealing, the implanted layers exhibit a weak absorption after the fundamental absorption edge (1.1 μm). PLA leads to the formation of a wide absorption band in the range of 1–5 μm with a maximum at 2 μm (0.6 eV), which correlates with the activation energy of the Se deep donor level in Si ($E_c - 0.593$ eV) [2].

Referents

1. Feldman, L.C. Materials analysis by ion channeling: submicron crystallography. / L.C. Feldman, J.W. Mayer, S.T.A. Picraux. – M. : Academic Press, 2012. – 305 c.
2. Janzén, E. High-resolution studies of sulfur- and selenium-related donor centers / E. Janzén, H. Stedman, G. Grossmann // Physical Review B. – 1984. – Vol. 29, № 4. – P. 1907–1918.

УДК 535.3

ВЛИЯНИЕ АЗИМУТАЛЬНЫХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ УГЛА КОНУСНОСТИ АКСИКОНА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ И ФУРЬЕ-СПЕКТР БЕССЕЛЕВА СВЕТОВОГО ПУЧКА

Рыжевич А.А.¹, Балыкин И.В.¹, Варанецкий А.М.¹, Казак Н.С.^{1,2}

¹Институт физики НАН Беларуси

²ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследовано влияние азимутальных осцилляций угла конусности аксикона на качество формируемого аксиконом бесселева светового пучка (БСП) и Фурье-спектр БСП (ФСБСП). С ростом амплитуды модуляции угла конусности B аксикона отклонения от распределения интенсивности в идеальном БСП становятся более выраженными, при этом число минимумов интенсивности, наблюдаемых в приосевом кольце при малом значении $B (\leq 0,05)$ в случае нечетного N равно N , а в случае четного – равно $2N$. При больших значениях $B (> 0,05)$ как в случае четного N , так и в случае нечетного N число минимумов в приосевом кольце пучка равно $2N$. Эллиптичность аксикона приводит к осцилляции интенсивности и значения пространственной частоты главной компоненты ФСБСП вдоль азимутальной координаты. Показано, что по азимутальной осцилляции пространственной частоты главной компоненты ФСБСП целесообразно определять амплитуду модуляции угла при основании аксикона.

Ключевые слова: бесселев световой пучок, параметр качества бесселева светового пучка, Фурье-спектр.

INFLUENCE OF AZIMUTHAL OSCILLATIONS OF THE AXICON CONE ANGLE ON THE INTENSITY DISTRIBUTION AND FOURIER SPECTRUM OF A BESSEL LIGHT BEAM

Ryzhevich A.A.¹, Balykin I.V.¹, Varanetski A.M.¹, Kazak N.S.^{1,2}

Institute of Physics of NAS of Belarus,

The State Scientific and Production Association "Optics, Optoelectronics and Laser Technology"

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The influence of azimuthal oscillations of the axicon cone angle on the quality of the Bessel light beam (BLB) formed by the axicon and the Fourier spectrum of the BLB (FSBLB) has been studied. With increasing amplitude of modulation of the cone angle B of the axicon, deviations from the intensity distribution in an ideal BLB become more pronounced, while the number of intensity minima observed in the paraxial ring at a small value of $B (\leq 0.05)$ in the case of odd N is equal to N , and in the case of even N is equal to $2N$. At large values of $B (> 0.05)$ both in the case of even N and in the case of odd N , the number of minima in the paraxial ring of the beam is equal to $2N$. The ellipticity of the axicon leads to oscillation of the intensity and value of the spatial frequency of the main component of the FSBLB along the azimuthal coordinate. It is shown that it is advisable to determine the modulation amplitude of the angle at the base of the axicon from the azimuthal oscillation of the spatial frequency of the main component of the FSBLB.

Key words: Bessel light beam, quality parameter of a Bessel light beam, Fourier spectrum.

Адрес для переписки: Рыжевич А.А., просп. Независимости, 68-2, г. Минск, 220072, Республика Беларусь e-mail: tol@dragon.bas-net.by

Введение. Для формирования бесселевых световых пучков (БСП) зачастую используются аксиконы. На данный момент невозможно изготовить аксикон идеально конической формы. Одним из отклонений формы аксикона от конической является наличие эллиптичности [1]. Под эллиптичностью понимается то, что поперечное сечение аксикона представляет собой эллипс. Ориентируем систему координат так, чтобы Ox и Oy совпадали с главными направлениями эллипса, ось Oz проходила через вершущку аксикона. В таком случае внешняя граница аксикона в сечении будет задаваться уравнением $\frac{x^2}{b_x^2} + \frac{y^2}{b_y^2} = 1$, где b_x, b_y – половины

длин главных осей эллипса. Тогда $\epsilon_a = 1 - b_x^2 / b_y^2$ – эксцентриситет аксикона (при условии $b_y > b_x$). С ростом продольной координаты и эксцентриситета поле за аксиконом искажается (таблица 1), поэтому

актуальной задачей является контроль формы аксиконов сразу после изготовления.

Таблица 1. Вид БСП в зависимости от значений координаты z и эксцентриситета ϵ_a .

$z, \text{ м}$	0,0100	0,0340
ϵ_a		
0,10		
0,18		

Поле при N осцилляциях угла конусности аксикона. Интерес также представляет случай, когда отклонения угла конусности аксикона носят периодический характер с большим количеством осцилляций, чем в случае эллиптичности, т. е. когда угол при основании аксикона $\alpha(\varphi) = \alpha_0(1 + B \cdot \sin(N\varphi))$, где N – число осцилляций, B – амплитуда модуляции угла при основании аксикона, α_0 – среднее значение угла при основании аксикона (таблица 2).

Таблица 2. БСП при различных значениях B и N

$B \backslash N$	0,005	0,014
2		
3		
4		

С ростом амплитуды модуляции угла конусности B наблюдаемые отклонения от распределения в идеальном пучке становятся более выраженными, при этом число минимумов интенсивности, наблюдаемых в приосевом кольце при малом значении $B (\leq 0,05)$ в случае нечетного N равно N , а в случае четного – равно $2N$. При больших значениях $B (> 0,05)$ как в случае четного N , так и в случае нечетного N число минимумов в приосевом кольце пучка равно $2N$.

Также нами построены поперечные распределения интенсивности в ФСБСП, формируемом эллиптическим аксиконом. При увеличении ϵ_a наблюдается сужение ФСБСП по оси y (таблица 3).

Таблица 3. ФСБСП при различных ϵ_a

ϵ_a	0,00	0,28
Фурье-спектр		

Для детального анализа ситуации были построены зависимости величин радиуса (соответствующего среднему значению пространственной

частоты) r_s , полуширины w_s и интенсивности I_s ФСБСП от азимутальной координаты (рисунок 1). Видно, что эллиптичность аксикона приводит к перераспределению энергии в спектре. «Уширение» аксикона в направлении y приводит к уменьшению угла отклонения парциальных волн в этом направлении и, следовательно, к снижению значения пространственной частоты главной компоненты спектра в этом направлении. Интенсивность компоненты в направлении y также снижается, а компоненты в направлении x , напротив, повышается.

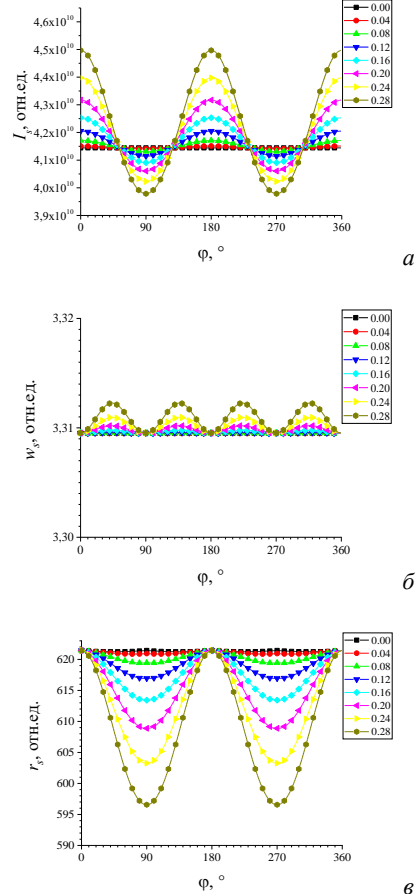


Рисунок 1 – Зависимость интенсивности I_s (а), полуширины w_s (б) и значения пространственной частоты r_s (в) главной компоненты спектра от угла φ

Закключение. Эллиптичность аксикона существенно влияет на распределение интенсивности и качество БСП, а в ФСБСП наиболее сильно проявляет себя в модуляции значения пространственной частоты главной компоненты спектра, в связи с чем по величине деформации кольца спектра можно судить об амплитуде модуляции угла конусности аксикона.

Литература

1. Wu, F. Effect of elliptical manufacture error of an axicon on the diffraction-free beam patterns / F. Wu // Optical Engineering. – 2008. – Vol. 47, № 8. – P. 083401.

УДК 621.315.592: 517.958

РЕЛАКСАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИНТЕРФЕРИРУЮЩИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ПУЧКАМИ

Гацкевич Е.И.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследовано уравнение теплопроводности, описывающее релаксацию температурного поля, инициируемого облучением полупроводниковых структур интерферирующими пучками импульсного лазера. Найдено аналитическое решение уравнения теплопроводности с периодическим источником, связанным с передачей энергии от электронной подсистемы фононам. Проанализировано влияние релаксационных процессов на фононную температуру.

Ключевые слова: уравнение теплопроводности, лазерное облучение, полупроводник, неравновесные носители заряда, релаксация.

RELAXATION OF THE TEMPERATURE FIELD UNDER IRRADIATION WITH INTERFERING LASER BEAMS

Gatskevich E.I.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The thermal conductivity equation describing the relaxation of the temperature field initiated by irradiation of semiconductor structures with interfering beams of a pulsed laser has been studied. An analytical solution of the heat equation with a periodic source associated with the transfer of energy from the electronic subsystem to phonons is found. The influence of relaxation processes on the phonon temperature is analysed.

Key words: thermal conductivity equation, laser irradiation, semiconductor, nonequilibrium charge carriers, relaxation.

Адрес для переписки: Гацкевич Е.И., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: gatskevich_elena@bk.ru

При облучении полупроводниковых структур двумя интерферирующими пучками от импульсного лазера в образцах создается периодически модулированное распределение плотности неравновесных носителей заряда (ННЗ), которое называют динамической решеткой (ДР). Релаксация ДР обусловлена несколькими конкурирующими процессами, основными из которых являются амбиполярная диффузия и Оже рекомбинация ННЗ. В результате рекомбинационных процессов происходит передача энергии фононам и формируется тепловая решетка. Возбуждение ДР широко используется для исследования теплофизических свойств полупроводниковых структур [1]. В настоящей работе проведено моделирование релаксационных процессов после возбуждения ДР, то есть после лазерного возбуждения.

Рассмотрим ситуацию, когда с помощью интерферирующих лазерных пучков в пленке возбуждается электронная решетка с некоторым периодом $\Lambda = 2\pi / q$, q – волновой вектор решетки. Будем считать, что длительность возбуждающего импульса существенно меньше времени рекомбинации t_R и времени диффузии t_D неравновесных носителей. При рекомбинации электронов поглощенная энергия передается кристаллической решетке (фононам), в результате чего формируется тепловая решетка. И тепловая и электронная решетка затухают (релаксируют) вследствие

диффузионных процессов. Считаем, что решетка возбуждается по всей толщине образца, что позволяет перейти к одномерному приближению.

В такой постановке задача сводится к уравнению теплопроводности с периодическими граничными условиями:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{Q_0}{t_R} e^{-\frac{t}{t_R}} (1 + \beta(t) \cos(qx)), \quad (1)$$

$$T(0, x) = T_0 (1 + \mu \cos(qx)),$$

$$T(t, x) = T \left(t, x + \frac{2\pi}{q} n \right),$$

$$Q_0 = \frac{E_0}{c\rho}.$$

Здесь $T(t, x)$ – температура, x – координата, параллельная поверхности образца, a – теплопроводность, c и ρ – теплоемкость и плотность образца, соответственно, E_0 – средняя плотность энергии лазерных пучков, поглощенная ННЗ и решеткой. Начальное условие соответствует фононной температуре образца (температуре решетки) после импульсного воздействия (до релаксационных процессов в электронной решетке) и обусловлено поглощением энергии лазерных пучков непосредственно фононами, здесь μ характеризует начальную пространственную модуляцию температуры, обусловленную интерференцией лазерных пучков.

При выборе источника тепла считали, что тепловая решетка формируется за счет рекомбинационных процессов в электронной решетке. $\beta(t) = \beta_0 e^{-\frac{t}{t_D}}$ – параметр, характеризующий затухание электронной решетки, обусловленное диффузией электронов.

Не нарушая общности решения, можем начать отсчет от температуры $T = T_0$. T_0 – это немодулированная часть температуры решетки.

Решение задачи будем искать в виде:

$$T(t, x) = T_1(t) + T_2(t) \cos(qx). \quad (2)$$

$T_1(t)$ – описывает усредненную температуру, определяемую немодулированным слагаемым источником тепла. $T_2(t) \cos(qx)$ – пространственно-модулированная часть температуры.

При подстановке указанного решения мы получаем отдельные уравнения для пространственно-модулированной и немодулированной частей решения, которые с учетом начальных и граничных условий имеют следующее решение:

$$T(t) = \frac{q_0 \beta_0 t_e \left(e^{-\frac{t}{t_e}} - e^{-\frac{t}{t_L}} \right)}{t_R (t_e/t_L - 1)} + \mu e^{-\frac{t}{t_L}}, \quad (3)$$

здесь $t_L = 1 / (q^2 a)$ обозначено время затухания тепловой решетки, t_e – эффективное время затухания электронной решетки. Это время определяется временем рекомбинации и временем диффузии электронов в электронной решетке,

$$t_e = \left(\frac{1}{t_R} + \frac{1}{t_D} \right)^{-1}.$$

Есть следующие предельные ситуации.

$t_L \gg t_R$ – температура в тепловой решетке выйдет на максимальное значение за счет поглощенной энергии электронной решетки и далее будет наблюдаться медленное затухание тепловой решетки, связанное с термодиффузионными процессами.

$t_L \ll t_R$ – тепловая решетка затухает слишком быстро, чтобы реагировать на рекомбинационные процессы в электронной решетке.

$t_D \ll t_R$ – тепловая решетка не возникнет, так как электронная решетка затухнет быстрее, чем энергия ННЗ передастся тепловой решетке.

$t_L \sim t_R$ и $t_R < t_D$ или $t_R \sim t_D$ – наиболее интересная ситуация, именно, эта ситуация наиболее интересна экспериментаторам [1], использующим метод ДР для получения данных о теплопроводности (температуропроводности).

Второе слагаемое в формуле (3) фактически определяется начальной пространственной моду-

ляцией тепловой решетки, $q_0 \beta_0$ – постоянная величина. Таким образом, амплитуда тепловой решетки определяется следующей нормированной температурой:

$$T_n(t) = \frac{t_e \left(e^{-\frac{t}{t_e}} - e^{-\frac{t}{t_L}} \right)}{t_R (t_e/t_L - 1)}. \quad (4)$$

Полученная формула была использована для анализа влияния различных релаксационных процессов в динамической решетке. На рисунке 1 приведены временные зависимости температуры решетки для различных значений времени рекомбинации (рисунок 1, а) и времени диффузии (рисунок 1, б) при указанных значениях остальных параметров.

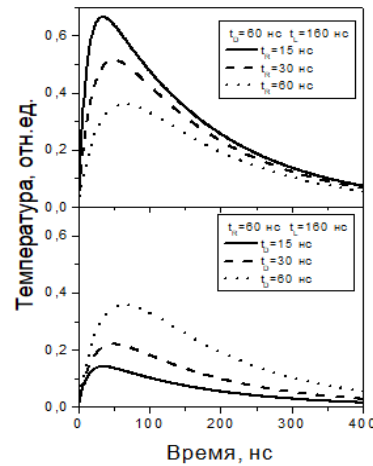


Рисунок 1 – Временные зависимости температуры решетки при различных временах релаксации

Используя полученное решение (4), можно определить время, когда достигается максимальная температура:

$$\frac{dT_n}{dt} = 0.$$

Из этого получаем время t_{\max} :

$$t_{\max} = \ln \left(\frac{t_e}{t_L} \right) \left(\frac{1}{t_L} - \frac{1}{t_e} \right)^{-1}.$$

Таким образом, сформулировано уравнение, описывающее релаксацию температурного поля, инициируемого воздействием интерферирующих лазерных пучков, и найдено и проанализировано его решение.

Литература

1. Оптические исследования теплопереноса в тонких пленках PbTe : Bi(Sb) / Е.В. Ивакин [и др.] // ФТП. – Т. 52, № 13. – С. 1584–1588.

УДК 621.315.592.4; 543.27.-8

ПОЛУЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СЛОЕВ НА ОСНОВЕ ZnO МЕТОДОМ SILAR

Денисюк С.В.¹, Куданович О.Н.¹, Ходин А.А.¹, Уткина Е.А.², Меледина М.В.²¹ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Для получения функциональных слоев газовых сенсоров на основе оксида цинка был использован метод ионного наслаивания (*Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction, SILAR*). Осаждение пленок проводилось на нанопористые подложки из оксида алюминия, как на пористую, так и на барьерную сторону. Часть полученных образцов были подвергнуты термической обработке для исследования влияния температуры на морфологию полученных пленок. Выявлены различия в структуре поверхности полученных поликристаллических пленок, осажденных на пористой и барьерной поверхностях подложки. Отмечено укрупнения составляющих пленку зерен в результате нагрева.

Ключевые слова: оксид цинка, морфология, оксид алюминия, ионное наслаивание.

FABRICATION FUNCTIONAL LAYERS BASED ON ZnO BY SILAR METHOD

Denisuk S.V.¹, Kudanovich A.M.¹, Khodin A.A.¹, Outkina E.A.², Meledina M.V.²¹SSPA "Optics, Optoelectronics, and Laser Technology"²The Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Functional layers for gas sensors based on ZnO were fabricated using Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR) technique. Zinc oxide films were deposited on nanoporous substrate of aluminum oxide both on porous and barrier side. Half of samples were processed by heat treatment to study the temperature impact on morphology of zinc oxide films. Differences in surface structure of polycrystalline films have been revealed depending on substrate porous and dense side. The films grains growth has been registered as a result of heat treatment.

Key words: zinc oxide, morphology, aluminum oxide, ionic deposition.

Адрес для переписки: Денисюк С.В., Куданович О.Н., Логойский тракт, 22/1, г. Минск, 220090, Республика Беларусь, e-mail: denicuk.sv@gmail.com, kudanovich@oelt.basnet.by

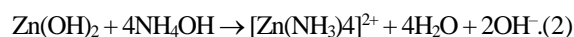
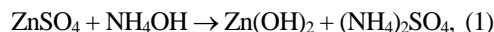
Оксид цинка представляет собой прямозонный полупроводник с шириной запрещенной зоны 3,27 эВ. Данный материал находит широкое применение в микроэлектронике, газовой сенсорики и солнечной энергетике [1].

Разработаны как физические, так и химические методы формирования пленок оксида цинка на диэлектрических подложках. Одним из перспективных методов получения тонких пленок ZnO является метод ионного наслаивания, также известный как *Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR)*. К преимуществам данного метода можно отнести возможность контроля толщины получаемых пленок и простоту введения легирующих примесей.

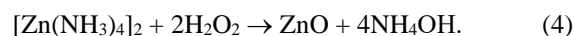
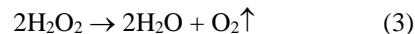
Методика эксперимента. Пленки оксида цинка были сформированы на пористых подложках оксида алюминия толщиной 42 ± 1 мкм, полученных анодирования алюминиевой фольги в щавелевокислом электролите с последующим удалением алюминиевой основы и переводом аморфного оксида в γ -фазу. Одна сторона подложки представляет собой пористую поверхность с диаметром пор 60–75 нм, а обратная – барьерный слой беспористого Al_2O_3 [2].

Для осаждения ZnO использовали катионный и анионный прекурсоры. В качестве катионного прекурсора использовался 0,1 М водный раствор

$ZnSO_4$ с добавлением гидроксида аммония, который при избытке аммиака образует с ионами цинка (II) комплекс $[Zn(NH_3)_4]^{2+}$ (1, 2):



В качестве анионного прекурсора выступал 1 % раствор перекиси водорода. При погружении подложки в первый раствор на поверхности подложки адсорбируется комплексное соединение цинка. При повышенной температуре второго раствора H_2O_2 разлагается с выделением кислорода (3) и окисляет ион металла (4) на подложке, покрытой его комплексом:



Производилось 10 циклов окунания для формирования однородной пленки ZnO. Часть образцов была подвергнута термической обработке при 300 °С в течение 1 часа для исследования влияния высоких температур на морфологию поверхности оксида цинка. Морфология образцов была исследована методом РЭМ на растровом электронном микроскопе Hitachi S-4800.

Результаты и обсуждение. Покрытия из оксида цинка на подложках из оксида алюминия,

полученные методом ионного наплавления (SILAR), представляют собой поликристаллические пленки толщиной 1–1,5 мкм, состоящие из сросшихся зерен. Изображение (рисунок 1) поверхности пленок ZnO, осажденных на пористую поверхность подложки, демонстрирует неупорядоченную губчатую структуру с межпористым расстоянием толщиной стенок 50–75 нм.

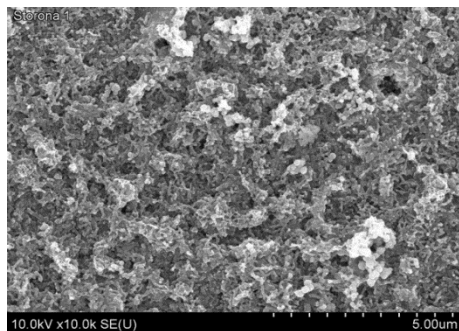


Рисунок 1 – Пленка оксида цинка на пористом оксиде алюминия

После отжига при 300 °С размер зерен пленки составил 250–300 нм (рисунок 2).

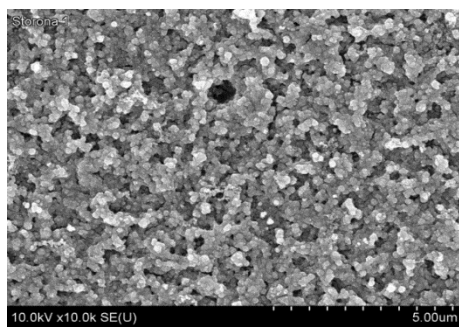


Рисунок 2 – Пленка оксида цинка на пористом оксиде алюминия после отжига

Пленка оксида цинка (рисунок 3), осажденная на барьерную сторону подложки, имеет мелкозернистую неупорядоченную структуру с размерами отдельных зерен от 50 до 300 нм.

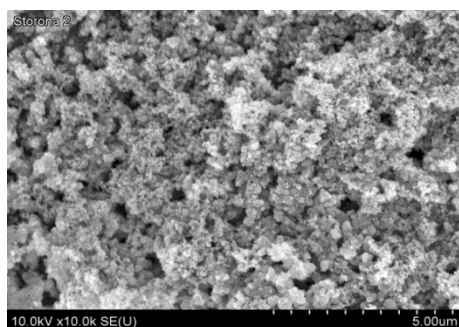


Рисунок 3 – Пленка оксида цинка на барьерной стороне оксида алюминия

Изображение образцов (рисунок 4) после термической обработки при 300 °С не демонстрирует заметных изменений в структуре полученных пленок или размеров составляющих их зерен.

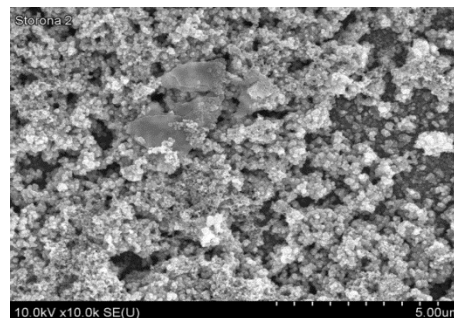


Рисунок 4 – Пленка оксида цинка на барьерной стороне оксида алюминия после отжига

При осаждении пленок оксида цинка на пористую поверхность Al₂O₃ методом SILAR и последующей термической обработки, получены адгезионно прочные слои с частичным проникновением ZnO в поры подложки (рисунок 5) на глубину около 40 нм.

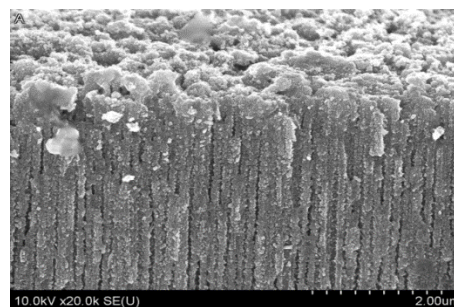


Рисунок 5 – Скол образца с пленкой оксида цинка на пористой стороне подложки оксида алюминия после отжига при 300 °С

Выводы. Пленки оксида цинка, полученные методом ионного наплавления (SILAR) обладают развитой поверхностью и высокой адгезионной прочностью по отношению к подложкам из пористого оксида алюминия, что позволяет рассматривать их как функциональные слои для полупроводниковых газовых сенсоров на базе алюмооксидной технологии.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ, проект T23КИ-011.

Литература

1. Borysiewicz, M.A. ZnO as a functional material, a review / M.A. Borysiewicz // Crystals. – 2019. – Vol. 9, iss. 10. – P. 505–534.
2. Лыньков, Л.М. Микроструктуры на основе анодной алюмооксидной технологии / Л.М. Лыньков, Н.И. Мухуров. – Минск : Бестпринт, 2002. – 216 с.

УДК 617.57-77

ПРОТЕЗ ПРЕДПЛЕЧЬЯ С ИСКУССТВЕННЫМИ МЫШЦАМИ

Грузд Н.А., Есьман Г.А., Габец В.Л.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Конструкции современных протезов и искусственных кистей существенно уступают биологическому прообразу в подвижности и функциональности, чем обусловлен интерес к разработке принципиально новых технических решений.

Ключевые слова: протез предплечья, искусственные мышцы.

FOREARM PROSTHETIC WITH ARTIFICIAL MUSCLES

Gruzd N.A., Esman G.A., Gabets V.L.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The designs of modern prostheses and artificial hands are important for the biological prototype of mobility and functionality, which has led to interest in the development of fundamentally new technical solutions.

Key words: forearm prosthesis, artificial muscles.

Адрес для переписки: Габец В.Л., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by

Двигательные функции, осуществляемые с помощью протезов верхних конечностей (далее – протезы), зачастую сводятся к воспроизведению основных движений при самообслуживании (еда ложкой, наливание жидкости в стакан и т. д.). В то же время диапазон движений, выполняемых здоровыми людьми в повседневной жизни, не ограничивается типичными бытовыми и рабочими действиями. Конструкции современных протезов и искусственных кистей существенно уступают биологическому прообразу в подвижности и функциональности, чем обусловлен интерес к разработке принципиально новых технических решений.

Специфические требования, связанные с уменьшением кинематической и динамической асимметрии движений сохранившейся и протезированной конечностей [1], в значительной степени ограничивают массогабаритные параметры разрабатываемого устройства, в связи с чем при конструировании протезов моделируются лишь важнейшие особенности кисти.

Другим ограничивающим фактором являются типовые детали и механизмы приборов, используемые в конструкциях протезов в качестве альтернативы двигательному аппарату.

Собственно, двигательный аппарат верхних конечностей состоит из пассивной части (кости и их соединения) и активной (мышцы и сухожилия).

Впервые попытки учесть анатомическую форму костей, связок и сухожилий были предприняты с созданием роботизированной руки *Anatomically Correct Testbed (ACT) Hand* [2]. С целью обеспечения рационального распределения усилий в конструкции *ACT Hand* воссоздана уникальная трансмиссия в виде системы переплетенных нейлоновых нитей, имитирующих принцип действия дорсального апоневроза пальцев кисти.

В последующих исследованиях процесс изготовления связок удалось оптимизировать путем замены нитей лоскутами силиконовой резины [3]. Аналогичным образом получены крестообразные и коллатеральные связки, образующие подобие суставной капсулы, и фиброзные влагалища пальцев. Кроме того, в отличие от *ACT Hand*, где межфаланговые сочленения реализованы посредством шарниров, в конструкции *Highly Biomimetic Anthropomorphic Robotic Hand* учтена сложная форма суставных поверхностей костей кисти. Технология 3D-сканирования позволила с высокой точностью копировать нефиксированные оси суставов и тем самым воспроизвести близкий к человеческим диапазон движений.

Вместе с тем функциональная конгруэнтность суставных поверхностей в теле человека обеспечивается наличием синовиальной жидкости, ее физико-механическими свойствами и свойствами хряща [4]. Биомеханика нормального функционирования сустава заключается в том, что при движении в суставном хряще происходит циркуляция интерстициальной жидкости. Отсутствие жидкой фазы между поверхностями сочленяющихся деталей искусственной конечности неизбежно влечет за собой нарушение ее локомоторной функции, т. е. свободного перемещения трущихся элементов, а также демпфирования динамических нагрузок, что в конечном итоге приводит к механическому разрушению.

В соответствии с законом динамизации (адаптивности) технических систем, жесткие системы для повышения их эффективности должны переходить к более гибкой, быстро меняющейся структуре [5]. Данный принцип успешно реализован в конструкциях мягких роботов и роботизированных конечностей, подвижность которых осуществляется за счет свойств гиперупругих материалов.

Положения мягкой робототехники как нельзя лучше применимы к протезам, поскольку повышение подвижности и минимизация риска получения травм при взаимодействии с ними на сегодняшний день остаются актуальными задачами протезостроения.

Существующие конструкции мягких роботизированных конечностей можно условно разделить на две группы: гибкие в суставах с тросовым механизмом и монолитные с пневмоприводом. Последние из-за наличия крупногабаритных систем автоматической подачи сжатого воздуха и сложности изготовления не могут быть использованы в практических целях.

Мягкий роботизированный протез X-Limb сочетает в себе монолитную структуру из полиуретана TPU90, полученную по принципу моделирования послойным наплавлением (FDM) на 3D-принтере, и тросовый привод, состоящий из пяти серводвигателей [6]. Движения пальцев совершаются за счет переменной жесткости конструкции, для чего в местах сгиба размещаются канавки со скругленными углами.

Положению кисти человека в покое при расслабленных мышцах и оптимальном натяжении сухожилий соответствуют анатомически нейтральные углы сгибания, составляющие порядка 30 градусов в пястно-фаланговых суставах и 15 в межфаланговых [7].

Учет рациональных амплитуд подвижности позволяет снизить нагрузку на привод и уменьшить механические напряжения на 30–35 процентов, тем самым продлевая срок службы протеза.

Сгибание осуществляется в области перешейка, образованного двумя V-образными канавками. Повысить устойчивость фаланг пальцев и устранить нежелательные их деформации можно с применением 3D-печати двумя материалами одновременно.

Учитывая вышеизложенный материал, конструкция пальца настоящего протеза может быть выполнена в соответствии с рисунком 1.

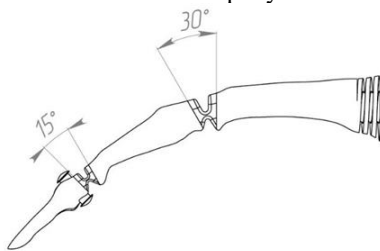


Рисунок 1 – Конструкция пальца

Все рассмотренные конструкции роботизированных конечностей так или иначе приводятся в действие посредством массива из сервоприводов. Такое решение в конечном итоге приводит к ограничению подвижности протеза из-за невозможности размещения необходимого числа двигателей,

либо же попросту не выходит за рамки лабораторных исследований.

В человеческом теле для получения механического движения используется иной подход – управляемое изменение формы. Преимущества такого привода проявляются в отсутствии трения и инерционности, характерных для электродвигателей.

Техническим аналогом мышечной ткани могут послужить конструкции мягких приводов на основе материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ), способные воспроизводить заданную конфигурацию в результате нагрева или посредством пропускания тока, совершая за термодинамический цикл полезную работу.

Методика изготовления и испытаний мягкого привода из никелида титана подробно изложена в работе [8].

Таким образом, результат достигается за счет размещения системы исполнительных элементов – искусственных мышц на полужестком каркасе, изготовленном в соответствии со строением костного скелета человека.

Общий вид вновь разработанного протеза предплечья с искусственными мышцами представлен на рисунке 2.

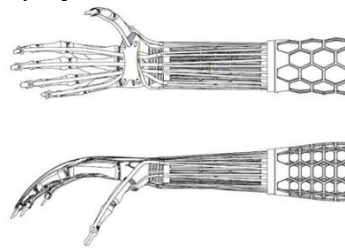


Рисунок 2 – Общий вид протеза предплечья с искусственными мышцами

Литература

1. Конструкции протезно-ортопедических изделий. Учеб. пособ. для техникумов / А.П. Кужекин [и др.]; Под ред. канд. техн. наук А.П. Кужекина. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 240 с.
2. Mechanisms of the anatomically correct testbed hand / A.D. Deshpande [et al.] // *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on.* – 2013. – Vol. 18, № 1. – P. 238–250.
3. Xu, Z. Design of a highly biomimetic anthropomorphic robotic hand towards artificial limb regeneration / Z. Xu, E. Todorov // *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).* – 2016. – P. 3485–3492.
4. Бегун, П.И. Биомеханика: учебн. для вузов / П.И. Бегун, Ю.А. Шукейло. – СПб. : Политехника, 2000. – 463 с.
5. Альтшуллер, Г.С. Найти идею. Введение в теорию решения изобретательских задач / Г.С. Альтшуллер. – Новосибирск : Наука, 1986. – 209 с.
6. A practical 3D-printed soft robotic prosthetic hand with a multi-articulating capabilities / A. Mohammadi [et al.] // *PLoS ONE* – 2020. – Vol. 15 (5).

7. Anatomically neutral joint: patent US5824095 / W.G. Di Maio, M.S. Marcolongo, A.-P.C. Weiss. – Publ. 20.10.1998.

8. Грузд, Н.А. Разработка мягкого привода на основе никелида титана для биомехатронных устройств / Н.А. Грузд, Е.И. Едало, С.Г. Мониц //

Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование М34 2023 (ICMSSTE 2023): материалы международной научно-практической конференции (16–19 мая 2023 г.) / отв. редактор В.В. Дядичев. – Симферополь : Издательский дом КФУ, 2023. – 384 с.

УДК 37.012

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АССОЦИАЦИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ С ЛОГАРИФМАМИ

Гундина М.А., Кондратьева Н.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрен пример практической реализации техники ассоциаций в современном образовательном процессе. Описаны преимущества использования метода ссылок – одного из методов создания ассоциаций в обучении математике.

Ключевые слова: техника ассоциаций, метод ссылок, образовательный процесс, мотивация обучающихся.

USING ASSOCIATIONS IN SOLVING PROBLEMS WITH LOGARITHMS

Hundzina M.A., Kondratieva N.A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. An example of the practical implementation of the association technique in the modern educational process is considered. The advantages of using the link method, one of the methods of creating associations in teaching mathematics, are described.

Keywords: the technique of associations, the method of references, the educational process, the motivation of students.

*Адрес для переписки: Гундина М.А., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
e-mail: hundzina@bntu.by, kondratieva@bntu.by*

Техника ассоциаций является полезным инструментом, который незаменим в образовательном процессе при изучении математики в техническом университете. Она позволяет запомнить обучающимся множество объектов, которые не связаны между собой. С помощью техники ассоциаций устанавливается связь новых знаний, которые обучающемуся необходимо усвоить, с уже полученными знаниями.

Данный подход широко применяется к разным возрастным группам обучающихся: от детей дошкольного возраста до студентов. Такой подход используется при изучении иностранных языков, освоении новых элементов в спортивной практике, получении новых умений и навыков в специальных учебных дисциплинах в университете.

В современном образовательном процессе метод обучения, основанный на использовании ассоциаций, используется при изучении различных дисциплин таких, как математика, физика, биология, информатика, теория коммуникаций, логика, политология, социология и многих других [1–2].

Известно, что под ассоциацией понимают взаимосвязи между отдельными определениями, явлениями, в результате которых упоминание

одного понятия вызывает воспоминание у обучающегося о другом, сочетающемся с ним понятием, что позволяет установить связь между ними для дальнейшего запоминания нового понятия [3].

Существует несколько техник ассоциаций, которые могут быть использованы в учебном процессе средней, старшей и высшей школы [4]. Приведем примеры использования этих техник для повышения мотивации обучающихся и увеличения уровня усвоения изученного материала.

Метод ссылок – один из методов ассоциаций, который позволяет создать связь между запоминаемым элементом и образом, представленным, например, на изображении.

Преимуществом этого метода является то, что система ссылок проста и легко запоминается. 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, поскольку он вызовет у обучающегося некоторые эмоции.

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 ссылок является одним из самых простых инструментов запоминания. Выбирается интересное изображение для представления элементов в списке, а затем связываются эти изображения с запоминающимся образом.

Примером использования метода ссылок в изучении математики может быть прием запоминания свойства логарифмов:

$$\log_a b \cdot \log_c d = \log_c b \cdot \log_a d.$$

Ассоциацией в этом случае могут быть качели. Переменные b и d будто раскачиваются на качелях и в какой-то момент меняются местами [4]. Полученная комбинация зрительных образов позволяет проще запомнить данное свойство логарифмов (рисунок 1).

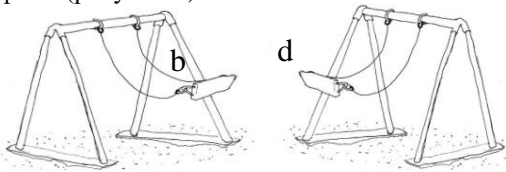


Рисунок 1 – Ассоциация для запоминания свойства логарифма

Рассмотрим пример решения следующей задачи:

Задача 1. Найти ближайшее целое число, не превосходящее результат вычисления следующего выражения

$$\log_2 3 \cdot \log_3 4 \cdot \log_4 5 \cdot \dots \cdot \log_{2022} 2023.$$

Решение: Используя описанное свойство, получим:

$$\log_2 3 \cdot \log_3 4 \cdot \log_4 5 \cdot \dots \cdot \log_{2022} 2023 = \log_2 4 \cdot \log_3 3 \cdot \log_4 6 \cdot \log_5 5 \cdot \dots \cdot \log_{2022} 2023,$$

Ближайшее целое значение будет 10.

Основной целью применения данной техники является вызов интереса к теме занятия, усиление механизмов памяти. На этапе рефлексии можно вернуться к списку предложенных обучающимся ассоциаций, и проанализировать – какие из них были наиболее «удачными». Возможно, что данная ассоциация для одних обучающихся подойдет, поскольку кто-то вспомнит детство, испытает

с этим положительные эмоции, и связь между ассоциацией, старыми и новыми знаниями окажется прочнее. Однако кому-то эта ассоциация может и не подойти, по причине того, что у обучающегося могут быть связаны и негативные эмоции с этой ассоциацией. В этом случае связь может оказаться непрочной и лучше эту ассоциацию будет заменить на другую.

Приведем еще два примера использования данного свойства.

Задача 2.

Найти значение выражения

$$\log_{16} 3 \cdot \log_3 7 \cdot \log_7 41 \cdot \log_{41} 128.$$

Решение: Используя описанное свойство, получим:

$$\begin{aligned} \log_{16} 3 \cdot \log_3 7 \cdot \log_7 41 \cdot \log_{41} 128 &= \\ = \log_{16} 128 \cdot \log_3 3 \cdot \log_7 7 \cdot \log_{41} 41 &= \\ = \log_{16} 128 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = \log_{2^4} 2^7 &= \frac{7}{4}. \end{aligned}$$

Задача 3.

Найти значение выражения

$$\log_3 5 \cdot \log_5 7 \cdot \log_7 8 \cdot \log_8 9.$$

Решение: Используя описанное свойство, получим:

$$\begin{aligned} \log_3 5 \cdot \log_5 7 \cdot \log_7 8 \cdot \log_8 9 &= \\ = \log_3 9 \cdot \log_5 5 \cdot \log_7 7 \cdot \log_8 8 &= \\ = \log_3 9 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 2. \end{aligned}$$

Заключение

Метод ассоциаций позволяет сделать структурным процесс запоминания. У студентов повышается уровень концентрации и переключаемости внимания. Ассоциативное восприятие и мышление учащегося приводят к тому, что появление простого для восприятия элемента, вызывает образ более сложного, связанного с ним элемента.

Ассоциативный механизм обладает функциональным и универсальным характером, затрагивая когнитивную, культурологическую, эмоциональную и волевую стороны. Данный механизм управляет возникновением произвольных вероятностных связей, то есть, ассоциаций.

Литература

1. Dibagi, S.G. Brain storming and association in mathematics education / S.G. Dibagi // Procedia – Social and Behavioral Sciences. – 2012. – Vol. 31. – P. 774–777.
2. Modeling students' interest in mathematics homework / J. Xu [et al.] // The Journal of Educational Research. – Vol. 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>.
5. Гундина, М.А. Роль ассоциаций в обучении математике / М.А. Гундина // Адукацыя і выхаванне. – 2022. – № 9 (369). – С. 38–44.

УДК 620.10

МОДАЛЬНЫЙ И ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ КОНЦЕНТРАТОРОВ ОВОИДНОЙ ФОРМЫ

Денис А., Луговой И.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе дан анализ концентраторов овоидной формы с целью возможности их применения в акустических системах.

Ключевые слова: концентратор, моделирование, гармонический анализ.

MODAL AND HARMONIC ANALYSIS OF VIBRATIONS OF OVOID SHAPE CONCENTRATORS

Denis A., Lugovoy I.V.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The work provides an analysis of ovoid-shaped concentrators with a view to the possibility of their use in acoustic systems.

Key words: concentrator, modeling, harmonic analysis.

Адрес для переписки: Луговой И.В., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by

В настоящей работе дан анализ концентраторов овоидной формы с целью возможности их применения в акустических системах. Овоид – замкнутая корбовая кривая, имеющая одну ось симметрии. Овоид воспроизводит природную форму яиц птиц и имеет высокую прочность на сжатие. Форма овоида и методика построения его формы приведена на рисунке 1, а.

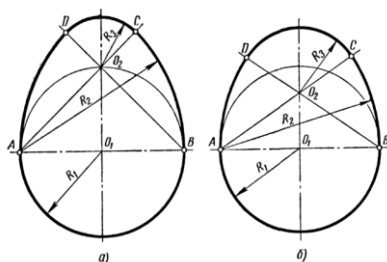


Рисунок 1 – Построение овоидной формы

При смещении точек O_2 и O_1 и изменения расстояния между ними при сохранении ширины AB овоид приобретает более округлую или заостренную форму. острым. (рисунок 1, б). При изменении ширины AB овоид приобретает форму показанную на рисунке 1, б. Начальными условиями компьютерного моделирования были приняты геометрические параметры упругих элементов, используемые материалы и пределы частот вынужденных колебаний акустической системы. Номинальный наружный диаметр кольца основной модели принят 50 мм, а толщина поперечного сечения – 10 мм. В качестве материала для моделей колец была принята сталь 45.

На рисунке 1, а приведено обоснование возможности использования концентраторов кольцевой формы в качестве трансформаторов колебаний в широких пределах ультразвуковых колебаний. Было установлено, что изменение частоты

вынужденных колебаний приводят к изменению числа узловых точек по периметру колец, которые могут иметь четное или нечетное количество узлов. При этом форма колеблющегося кольца на различных частотах колебаний принимает может иметь как симметричную, так и несимметричную формы мод и различную конфигурацию: овальную, треугольную, четырех-, пяти-, шестиугольную. Наиболее оптимальным вариантом кольца, оказалась осесимметричная форма с наименьшим поперечным сечением в нижней части, которой имеет, образующая моду изгибных колебаний. У такой формы концентратора образуется минимальное количество узлов изгибных колебаний и наибольших значений амплитуды колебаний на рабочем участке.

Модальный анализ заключался в сравнении мод колебаний концентратора овоидной формы двух видов: одного – с постоянной толщиной сечения, другого с – переменной толщиной по периметру кольца (рисунок 2, б).

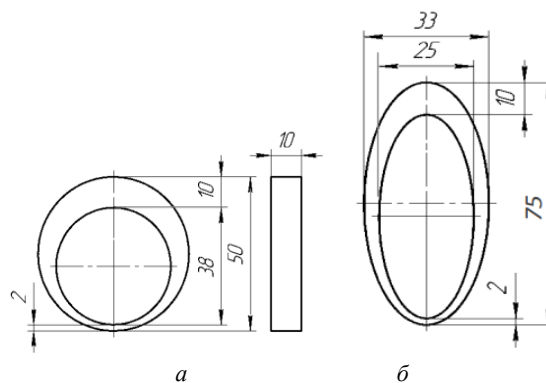


Рисунок 2 – Эскизы кольцевого и овоидного концентратора колебаний

Модальный анализ был проведен в программе *SolidWorks Simulation Premium*, который позволяет выполнить визуальную оценку волновых процессов, оценить влияние геометрических параметров упругих элементов и частот вынужденных колебаний на моды собственных колебаний концентраторов. Компьютерное моделирование основано на анализе напряженного состояния, для чего используется связь напряжения σ с величиной смещения δl , которое характеризует амплитуду упругих колебаний при действии динамических сил. Цветовая окраска участков упругих тел характеризует напряженное состояние и численную величину напряжения σ , возникающего в сечениях упругих элементов от действия знакопеременных периодических сил. Полученные результаты моделирования представлены на рисунке 3. Результаты расчетов показали, что изменение частоты вынужденных колебаний приводит к возбуждению в кольцах резонансных колебаний в направлении одной из координатных осей. Повышение частоты колебаний до уровня 40 кГц и более приводит в кольцевом концентраторе к образованию поперечных колебаний, вызывающих изгиб и скручивание кольца в перпендикулярной плоскости, которые снижают эффективность работы системы.

Гармонический анализ исследуемых моделей колец показал, что в рассматриваемом диапазоне частот вынужденных колебаний наблюдаются несколько пиков частот собственных колебаний, совпадающих с вынужденными колебаниями, при которых возникают резонансные явления по направлению одной из осей координат. При этом наибольшая амплитуда колебаний наблюдается в направлении одной из осей координат, а интервалах между пиковыми значениями возбуждаются сложные изгибные или крутильные колебания, действующие по двум или трем координатам.

Схожие процессы колебаний наблюдаются в кольцах с переменным сечением (рисунок 4).

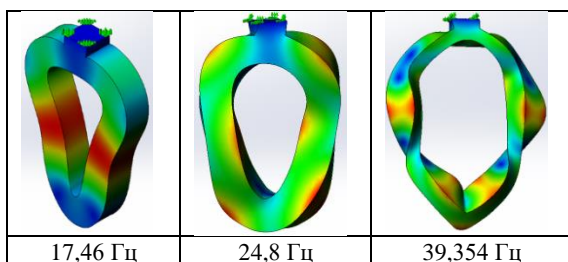


Рисунок 3 – Моды колебаний кольцевых концентраторов оvoidной формы постоянного сечения

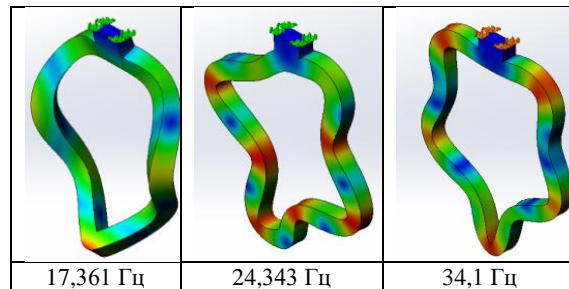


Рисунок 4 – Моды колебаний кольцевых концентраторов оvoidной формы переменного сечения

Анализ полученных результатов, представленных в диаграмме, позволил сделать следующие выводы:

- наибольшие значения амплитуды колебаний возникают в кольцах всех форм в области низких частот в пределах 2–4 кГц;

- в кольцах первой и третьей форм (круглом и удлиненного овала) наблюдается закономерная периодичность пиков резонансных колебаний по всем координатным направлениям. Кольцо второго типа не имеет явной выраженной закономерности периодичности образования резонансных колебаний;

- интенсивность колебаний в моделях первой и третьей форм понижается по мере повышения частоты вынужденных колебаний. Вторая модель кольца позволяет получить существенное возрастание амплитуды боковых колебаний в направлении оси X на частоте 13 кГц. При этом боковые колебания по направлению оси X в диапазоне частот 8–16 кГц убывают до минимума, а затем образуются вновь в области ультразвуковых частот (16,8 кГц);

- у модели третьей формы наблюдается нарастающий характер амплитуды продольных колебаний вдоль оси Y до частоты 11 кГц, при которой достигаются наибольшие значения, после чего происходит постепенное уменьшение интенсивности колебаний;

- в области ультразвуковых колебаний (с частотой более 16 кГц) наиболее интенсивные колебания достигаются: в кольце круглой формы – в продольном направлении вдоль оси Y ; в кольце второй формы – поперечные колебания вдоль оси Z ; в кольце третьей формы – боковые колебания в направлении X .

УДК 544.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОЙ СПОСОБНОСТИ СПЛАВА МАГНИЯ ПОСЛЕ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТНОЙ ОБРАБОТКИ

Долгушин Я.В.¹, Медвецкова В.М.^{1,2}, Крит Б.Л.^{1,2}

¹Московский Авиационный Институт (Национальный Исследовательский Университет)

²Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

Москва, Российская Федерация

Аннотация. В данной работе была исследована фотокаталитическая способность магниевых сплавов, подвергнутого ПЭО-обработке. Представлены результаты, демонстрирующие проявление ПЭО-покрытием фотокаталитической активности.

Ключевые слова: фотокатализ, магниевый сплав, ПЭО-покрытие.

INVESTIGATION OF THE PHOTOCATALYTIC ABILITY OF MAGNESIUM ALLOY AFTER PLASMA-ELECTROLYTIC TREATMENT

Dolgushin Y.V.¹, Medvetskova V.M.^{1,2}, Krit B.L.^{1,2}

¹Moscow Aviation Institute (National Research University)

²Moscow State University of Technology "STANKIN"

Moscow, Russian Federation

Abstract. In this work, the photocatalytic ability of magnesium alloy subjected to PEO treatment was investigated. Results are presented demonstrating the manifestation of photocatalytic activity by the PEO-coating.

Key words: photocatalysis, magnesium alloy, PEO-coating.

Адрес для переписки: Долгушин Я.В., Волоколамское шоссе, 4, г. Москва, 125993, Российская Федерация
e-mail: d.yroslav@mail.ru

Согласно определению, принятому ИЮПАК, под фотокатализом (ФК) подразумевают изменение скорости или возбуждение химических реакций под действием света в присутствии фотокатализаторов – веществ, способных при поглощении света вызывать химические превращения участников реакций, вступая с последними в промежуточные химические взаимодействия и регенерируя свое состояние после каждого цикла таких взаимодействий [1]. Принцип ФК лежит в способности поверхности приходить в возбужденное состояние при экспонировании оптическим излучением в определенных условиях и выделять избыточную энергию возбуждения в окружающую среду.

Одним из прикладных проявлений ФК активности является использование присущих поверхности различных материалов антибактериальных свойств и возможности самоочистки. В большой степени это свойственно метаматериалам – искусственным средам, представляющих собой как периодическую, так и гетерогенную смесь частиц веществ различной природы, и характеристики которых обусловлены в первую очередь резонансными свойствами составляющих его элементов, а не структурой [2; 3]. Ряд исследований указывают на принадлежность к метаматериалам и проявлению ФК способностей сплавами вентильных металлов (алюминия, магния, титана), подвергнутых плазменно-электролитной обработке (ПЭО) [4; 5].

Возникновение ФК способности может быть обусловлено тем, что формируемое пористое ПЭО-покрытие состоит из керамикоподобных

нанофрагментов оксидной фазы, обладающей полупроводниковыми свойствами. Возбуждение источником электромагнитного излучения, имеющим энергию выше ширины запрещенной зоны, приводит к образованию осциллирующих электрон-дырочных пар. Энергия, эмитируемая возбужденной поверхностью ФК, способна оказать воздействие на окружающую среду, вызывая снижение пороговых значений окислительно-восстановительных реакций, инактивацию и деструкцию вирусов, подавление метаболической активности клеток патогенных микроорганизмов.

Объектом изучения служил ультралегкий сплав Mg–8Li–1Al–0.6Ce–0.3Y. ПЭО проводили в электролите состава: 15 г/л алюмината натрия NaAlO₂ и 1,2 г/л гидроксида калия КОН. Режим обработки: анодно-катодный, при напряжении 375–465 В, плотности тока 10 А/дм² и токовом соотношении $I_A/I_K = 0,9$. Продолжительность обработки составляла 20 минут.

Для оценок ФК способности была выбрана реакция деградации раствора метиловый оранжевый (C₁₄H₁₄N₃O₃SNa) 0,1 г/100 мл в дистиллированной воде при облучении ультра-фиолетовым источником света мощностью 36 Вт. Мониторинг процесса деградации раствора проводили с использованием спектрофотометра СФ-46. Кинетические зависимости изменения оптической плотности раствора в отсутствие и присутствии испытуемых образцов представлены на рисунке 1.

Видно, что присутствие поверхности ультралегкого сплава магния, подвергнутого ПЭО, в 2 раза ускоряет процесс разложения метилоранжа по срав-

нению с самопроизвольной реакцией при воздействии ультрафиолета. Причиной этого мы считаем проявляемую ПЭО-покрытием ФК активность.

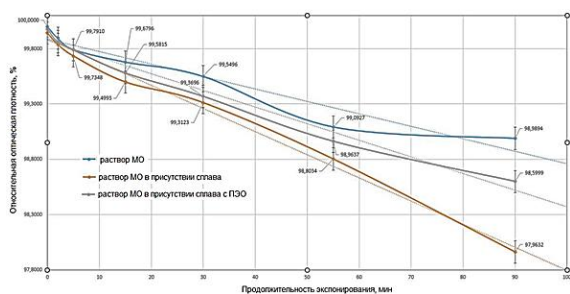


Рисунок 1 – Кинетические зависимости деградации раствора метилоранжа

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-49-00098) с использованием оборудования Центра коллективного пользования МГТУ «СТАНКИН».

УДК 621.382, УДК 621.798

УГЛЕНАПОЛНЕННЫЙ ПЛАСТИК – МАТЕРИАЛ ДЛЯ УПАКОВКИ ИЗДЕЛИЙ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Ефименко С.А., Шевелёва А.А.

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Упаковка изделий электроники должна обеспечивать защиту приборов при хранении. В зависимости от характеристик приборов может использоваться разная конструкция упаковки и применяться разные материалы. Показано преимущество использования кассет из угленаполненного полиамида УПА 6–20 для упаковки изделий силовой электроники по сравнению с другими типами упаковки.

Ключевые слова: упаковка, угленаполненный полиамид, статическое электричество, изделия силовой электроники.

CARBON-FILLED PLASTIC IS A MATERIAL FOR PACKAGING POWER ELECTRONICS PRODUCTS

Efimenko S.A., Sheveleva A.A.

JSC "INTEGRAL" – Managing Company of INTEGRAL Holding
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The packaging of electronic products should ensure the protection of devices during storage. Depending on the characteristics of the devices, different packaging designs can be used and different materials can be used. The advantage of using cassettes made of carbon-filled polyamide UPA 6-20 for packaging power electronics products in comparison with other types of packaging is shown

Keywords: packaging, carbon-filled polyamide, static electricity, power electronics products.

Адрес для переписки: Ефименко С.А., ул. Казинца И.П., 121А, г. Минск, 220108, Республика Беларусь
e-mail: SEfimenko@integral.by

Упаковка изделий микроэлектроники должна соответствовать ряду требований [1]. Микросхемы должны упаковываться в индивидуальную или групповую тару, которая должна обеспечивать защиту микросхем от воздействия статического электричества и (или) внешних магнитных полей. Материал упаковки должен быть некоррозионным, проводящим или антистатическим.

Конструкция упаковки должна допускать возможность изъятия части микросхем с сохранением защитных свойств этой тары для оставшихся микросхем, а также переупаковывание приборов. Должно быть исключено перемещение микросхем внутри тары, приводящее к их повреждению. Упаковка должна обеспечивать сохранность приборов в течение до 25 лет.

Литература

1. Standard conditions for gases // IUPAC. Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book") / Compiled by A. D. McNaught and A. Wilkinson. – Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1997.
2. Давидович, М.В. Гиперболические метаматериалы: получение, свойства, применения, перспективы / М.В. Давидович // УФН. – 2019. – Т. 189, № 12. – С. 1249–1284.
3. Pendry, J.B. Controlling Electromagnetic Fields / J.B. Pendry, D.R. Schurig, // Smith Science. – 2006. – № 312, 5781. – P. 1780–1782.
4. Photocatalyst: patent US 2015/0068906 Al. J. Curran, K. Chipasa, M. Mowbray, A. Leigh – 2015.
5. Antibacterial activity of bioceramic coatings on Mg and its alloys created by plasma electrolytic oxidation (PEO): A review / A. Fattah-alhosseini [et al.] // Journal of Magnesium and Alloys. – 2022. – № 10. – P. 81–96.
6. Formation of plasma electrolytic oxidation coatings on pure niobium in different electrolytes / T. Wu [et al.] // Applied Surface Science. – 2022. – № 573, 151629.

В качестве упаковки приборов в металлопластиковых корпусах широко используются пеналы из пластмассы. Для защиты от воздействия статического электричества на поверхность пеналов наносят антистатическое покрытие. Однако поверхности, обработанные антистатиком, не считаются долговечными и могут потребовать повторной обработки для сохранения свойства низкой заряжаемости [2].

Долгое время в качестве материала упаковки ЭКБ в металлокерамических корпусах использовалась алюминиевая фольга. Такая упаковка не подвержена коррозии, защищает приборы от воздействия статического электричества. Однако такая упаковка является достаточно дорогой. Кроме того, для приборов силовой электроники в металлокерамических корпусах она не совсем приемлема. Поскольку такие корпуса должны обеспечить достаточный теплоотвод, они имеют большую массу по сравнению с маломощными приборами [3]. Под действием веса приборов фольга деформируется и не обеспечивает должную защиту приборов.

В настоящее время в технике широкое применение получили угленаполненные пластики, в том числе полиамиды УПА 6–20 производства РУП «Светлогорское производственное объединение «Химволокно» [4]. Цифра 6 в обозначении – марка полиамида; цифра 20 указывает на содержание в композиции углеродного наполнителя. Угленаполненные полиамиды УПА 6 предназначены для производства методом литья под давлением или литьевого прессования изделий конструкционного, антифрикционного, антистатического назначения для нефтехимической, машиностроительной, электронной и других отраслей промышленности.

УПА 6–20 обладает следующими характеристиками:

- низкая плотность ($1,18 \text{ г/см}^3$);
- широкий интервал рабочих температур;
- низкий коэффициент термического расширения;
- повышенная прочность при растяжении и изгибе;
- хорошая электро- и теплопроводность;
- стойкость к агрессивным средам;
- низкий коэффициент трения.

Материал обладает высоким показателем текучести расплава, что позволяет отлить из него изделия разной конфигурации.

Была разработана упаковка (кассеты) для силовых приборов в корпусах КТ-97 и была изготовлена методом литья под давлением (рисунок 1). Режим литья установлен следующий:

- температура литья $220\text{--}260\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$;

- давление литья (на материал) при впрыске $118\text{--}147 \text{ МПа}$;
- температура формы $40\text{--}50 \text{ }^\circ\text{C}$;
- выдержка под давлением в течение 30 с;
- выдержка в пресс-форме $10\text{--}20 \text{ с}$.



Рисунок 1 – Приборы в корпусе КТ-97В в кассетах из угленаполненного полиамида УПА 6-20

Отлитые заготовки имеют четкие и ровные контуры, гладкую поверхность без усадочных раковин, трещин, вздутия. Отверстия имеют правильную форму. Размеры отливок соответствуют требованиям конструкторской документации на кассеты.

Замеренное значение поверхностного сопротивления (R_s) составляет $10^3\text{--}10^5 \text{ Ом/кв}$. Такое значение поверхностного сопротивления согласно ГОСТ ИЕС TR 61340-5-5-2022 соответствует верхнему значению проводящего материала (менее 10^4 Ом) и нижнему значению рассеивающего ($10^4\text{--}10^{11} \text{ Ом}$).

Таким образом, упаковка, изготовленная из угленаполненного полиамида УПА 6–20, позволяет обеспечивать защиту приборов от воздействия статического электричества и соответствует всем перечисленным выше требованиям к упаковке для микросхем. Кроме того по сравнению с упаковкой из алюминиевой фольги она не деформируется под действием массивных силовых приборов и ее стоимость примерно в три раза меньше.

Литература

1. ГОСТ 18725-83. Микросхемы интегральные. Общие технические условия.
2. ГОСТ ИЕС TR 61340-5-5-2022 «Электростатика. Защита электронных устройств от электростатических явлений. Требования к упаковке, применяемой в производстве электроники».
3. Основы силовой электроники / А.И. Белоус [и др.]. – М. : Техносфера, 2019. – 424с.
4. Полиамиды угленаполненные : технические условия ТУ ВУ400031289.086-2009.

УДК 621.38

ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТАКТА К СЛОЮ АЛЮМИНИЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ ФОРМИРУЕМОЙ МЕТОДОМ ВЗРЫВНОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ

Жамойть А.Е., Козодоев С.В., Занько А.И., Видрицкий А.Э.

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследованы способы достижения электрического контакта к алюминию металлизацией Ti/Ni/Au формируемого методом взрывной фотолитографии (*lift-off*). Получены электрические контакты с применением ионной очистки длительностью 30 минут и отжиге 450 °С сопротивлением 1,5–5 Ом на контакт.

Ключевые слова: электрический контакт, ионная очистка, температура отжига, электронно-лучевое напыление, взрывная литография.

RECEIVING ELECTRICAL CONTACT TO THE ALUMINUM LAYER BY METALLIZATION FORMED BY LIFT-OFF PHOTOLITHOGRAPHY METHOD

Zhamoit A.E., Kozodoev S.V., Zanka A.I., Vidritsky A.E.

JSC "INTEGRAL" – Managing Company of INTEGRAL Holding
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Methods for achieving electrical contact with aluminum by metallization of Ti/Ni/Au formed by lift-off photolithography have been studied. Electrical contacts were obtained using ion cleaning for 30 minutes and annealing at 450 °C with a resistance of 1.5–5 Ohms per contact.

Key words: electrical contact, ion cleaning, annealing temperature, electron beam deposition, lift-off lithography.

Адрес для переписки: Жамойть А.Е., ул. Казинца И.П., 121А, г. Минск, 220108, Республика Беларусь
e-mail: AZhamoit@integral.by

Введение. Получения надежного электрического контакта между двумя проводниками является критически важным фактором для последующей работоспособности изделий микронной промышленности. Как правило, после формирования одного слоя металлизации, его поверхность необходимо покрыть слоем пассивации. Далее проводится вскрытие контактных окон и напыление второго слоя металлизации.

Непосредственно перед напылением второго слоя металлизации, в сформированном контактном окне не должно находиться каких-либо тонких пленок. После напыления электрический контакт получен не был.

Одной из возможных причин отсутствия электрического контакта является формирование естественного оксида алюминия 3–5 нм, как указано в [1].

Методика эксперимента. Для отработки технологии получения электрического контакта к алюминию проводилось формирование цепочки контактов Al-Ti/Ni/Au количеством 100–10000 шт.

Формирование алюминиевой металлизации выполнялось методом плазмохимического травления по маске фоторезиста. После снятия фоторезиста проводилось осаждение плазмохимического оксида, слоя пассивации. В дальнейшем проводилось вскрытие пассивации, формирование контактных окон размером 4 мкм методом плазмохимического травления. Полученная структура представлена на рисунке 1.

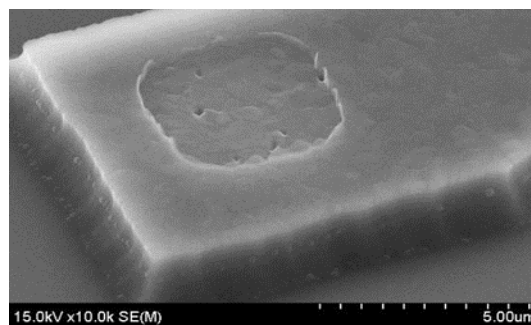


Рисунок 1 – Фото поверхности вскрытого контакта в пассивации

Далее формирование слоя Ti/Ni/Au проводилось методом взрывной фотолитографии (*lift-off*) и электронно-лучевым напылением.

Перед напылением Ti/Ni/Au с толщинами 10/250/40 мкм соответственно [2], проводилось очистка поверхности алюминиевых площадок ионным источником типа торцевого холлового ускорителя (ТХУ). Время очистки составляло 5, 10, 20 и 30 мин. После формирования двухуровневой металлизации проводился отжиг длительностью 30 мин при температуре 300–500 °С в среде азота.

Результаты и обсуждения. При использовании ионной очистки длительностью 5 минут электрический контакт к алюминию отсутствовал. С увеличением времени очистки до 10–30 минут был получен электрический контакт к алюминию.

На рисунке 2 представлена зависимость сопротивления на контакт от времени ионной очистки.

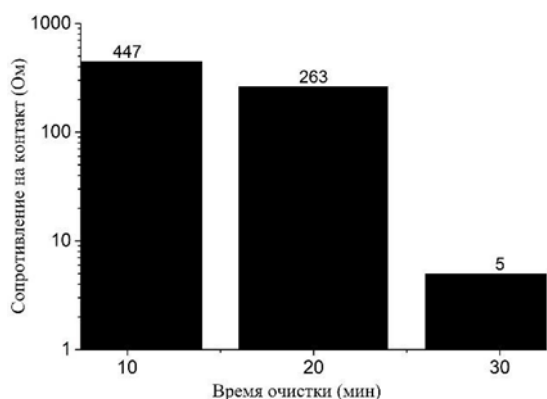


Рисунок 2 – Зависимость сопротивления на контакт от времени ионной очистки

Проведение ионной очистки длительностью более 5 минут позволило получить электрический контакт. С увеличением времени ионной очистки с 10 до 30 минут сопротивление на один контакт уменьшается с 447 Ом до 5 Ом на контакт.

Дополнительно снизить сопротивление можно проведением отжига. На рисунке 3 представлена зависимость сопротивления на контакт от температуры отжига с варьированием времени ионной очистки.

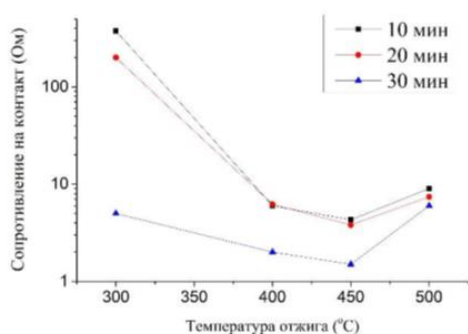
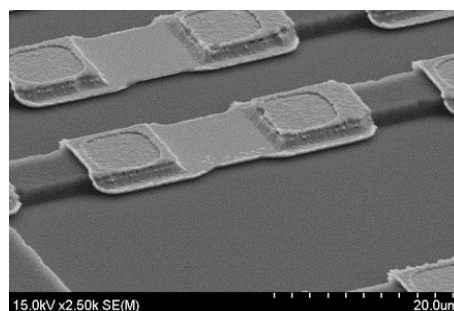
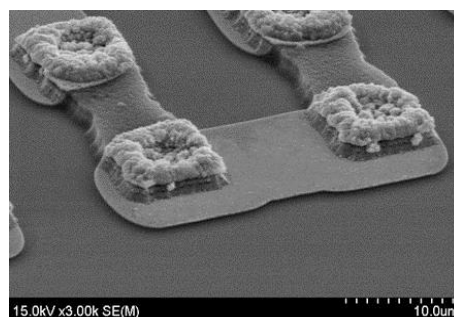


Рисунок 3 – Зависимость сопротивления на контакт от температуры отжига и времени ионной очистки

Из рисунка видно, что проведение отжига приводит к уменьшению сопротивлению на контакт до температуры 450 °С. Увеличение же температуры отжига приводит к неоднозначным результатам. При температуре отжига 500 °С происходит увеличение сопротивления. Фото поверхности цепочек после отжига при 400 °С и 500 °С представлено на рисунке 4.



а



б

Рисунок 4 – Внешний вид поверхности слоя Ti/Ni/Au после отжига: а) 400 °С, б) 500 °С

Из рисунка видно, что обрывов и механических деформаций при 400 °С не обнаружено. А уже под воздействием температуры отжига 500 °С происходит деформация и частичный обрыв слоя металлизации Ti/Ni/Au. Это и приводит к увеличению электрического сопротивления.

Выводы. Получение электрического сопротивления с наименьшим значением к алюминию достигается использованием ионной очистки перед напылением последующей металлизации в течении 30 мин с последующим отжигом в среде азота длительностью 30 мин при температуре 450 °С.

Литература

1. Гурский, Л.И. Структура и кинетика взаимодействия металлов с окисляющими средами / Л.И. Гурский, Б.А. Зеленин; под ред. С.А. Астапчика. – Минск : Наука и техника, 1982. – 192 с.
2. Huang, Q. Electroplated indium bump arrays and the bonding reliability / Q. Huang, G. Xu, G. Quan. – 2010. – P. 6.

УДК 621.382

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ ПАРАЗИТНОГО ТУННЕЛЬНОГО ТОКА В ЭЛЕМЕНТАХ ФЛЕШ-ПАМЯТИ

Жевняк О.Г., Борздов А.В., Борздов В.М.

Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В настоящей работе с помощью численного моделирования методом Монте-Карло электронного переноса в короткоканальных МОП-транзисторах с плавающим затвором, лежащих в основе функционирования современных элементов флеш-памяти, рассмотрено влияние ряда конструктивно-технологических параметров данных транзисторов на величину паразитных токов, проникающих на плавающий затвор. Показано, что с уменьшением длины проводящего канала, а также глубины залегания истоковой и стоковой областей величина этого тока увеличивается, что необходимо учитывать при проектировании перспективных элементов флеш-памяти.

Ключевые слова: элемент флеш-памяти, МОП-транзистор с плавающим затвором, туннелирование электронов, метод Монте-Карло.

MONTE CARLO SIMULATION OF EFFECT OF PHONON'S AND ION'S SCATTERINGS ON ELECTRON MOBILITY IN FLASH MEMORY ELEMENTS

Zhevnyak O.G., Borzdov A.V., Borzdov V.M.

Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. In present paper the effects of constructive parameters on parasitic tunnel current in short-channel MOSFETs with floating gate are studied by Monte Carlo simulation of electron transport. Such transistors are the base of contemporary flash-memory cells. Obtained data show that parasitic current is increased as result of the decreasing of channel length as well as drain region depth.

Key words: flash memory cell, MOS-transistor with floating gate, electron tunneling, Monte Carlo simulation.

Адрес для переписки: Жевняк О. Г., ул. Коржа, 1, 39, г. Минск, 220036, Республика Беларусь
e-mail: zhevnyakog@mail.ru

Введение. Повышение плотности упаковки микросхем флеш-памяти приводит к значительному уменьшению областей протекания электрического тока в кремниевых МОП-транзисторах с плавающим затвором, являющихся базовым элементом этих микросхем [1]. Это сопровождается резким возрастанием величин паразитных токов утечки, которые в конечном счете могут способствовать искажению хранящейся в элементах флеш-памяти информации (см., например, [2; 3]). Недопустимо высокое значение величины паразитного тока возникнет при одновременном стечении двух факторов: сильного разогрева электронов тянущим полем стока МОП-транзистора с плавающим затвором и скапливанием большого количества электронов у поверхности раздела Si/SiO₂. Поэтому весьма важно при разработке перспективных элементов флеш-памяти высокой плотности упаковки стараться предупреждать появление у данной поверхности раздела большого количества горячих электронов.

Целью настоящего исследования явилось моделирование паразитных туннельных токов в короткоканальных МОП-транзисторах с плавающим затвором методом Монте-Карло. Главными задачами нашей работы было изучение влияния на относительную величину паразитного тун-

нельного тока ряда конструктивно-технологических параметров данного транзистора, в частности, длины проводящего канала, глубины залегания истоковой и стоковой областей в подложку и концентрации акцепторной примеси в подложке.

Приборная структура. На рисунке 1 приведена структурная схема моделируемого транзистора.

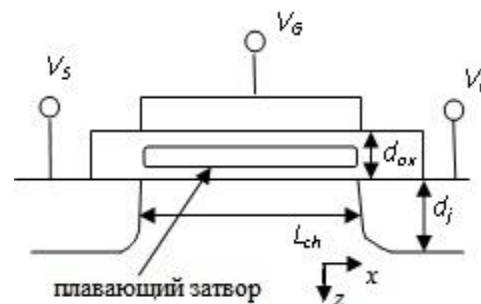


Рисунок 1 – Структурная схема моделируемого элемента флеш-памяти на основе МОП-транзистора с плавающим затвором

Рассматривался прибор со следующими конструктивно-технологическими параметрами: толщина подзатворного окисла $d_{ox} = 7$ нм, толщина туннельного окисла $d_{tun} = 2$ нм, толщина плавающего затвора $d_{float} = 2$ нм, концентрация донорной примеси в областях истока и стока

$N_D = 10^{26} \text{ м}^{-3}$, концентрация акцепторной примеси в подложке $N_A = 10^{24} \text{ м}^{-3}$, Длина канала L_{ch} изменялась от 0,1 до 0,3 мкм, а глубина залегания истоковой и стоковой областей в подложку d_j от 10 до 100 нм. Значения напряжения на затворе V_G и на стоке V_D равнялись 2 В (стандартные значения для режима считывания информации).

Используемая модель. Паразитный туннельный ток образуют электроны, находящиеся в проводящем канале у границы раздела Si/SiO₂ и туннелирующие на плавающий затвор через туннельный оксид. Плотность этого тока численно может быть рассчитана согласно

$$j = eN_n D v_{\text{др}},$$

где e – заряд электрона, N_n и $v_{\text{др}}$ – концентрация и дрейфовая скорость электронов, находящихся у границы раздела Si/SiO₂, D – коэффициент туннелирования, определяемый величиной энергии электронов E и высотой барьера H на границе раздела Si/SiO₂. Так как вдоль канала изменяются и значения величин N_n и $v_{\text{др}}$, то величина паразитного туннельного тока будет также существенно изменяться вдоль канала и может быть рассчитана только на основании моделирования электронного переноса методом Монте-Карло.

Расчет плотности электронных токов, в том числе паразитных, осуществлялся на основе моделирования электронного переноса в канале МОП-транзистора методом Монте-Карло и самосогласованного решения соответствующего уравнения Пуассона. Алгоритмы такого моделирования описаны в работе [4], а процедура расчета туннельного тока через барьер трапецидального типа, который возникает в туннельном оксиде, рассмотрена в работе [5].

Результаты моделирования и их обсуждение. На рисунке 2 приведены полученные в результате численного моделирования изменения вдоль проводящего канала транзистора относительной величины паразитного туннельного тока к величине дрейфового тока стока в зависимости от длины канала (a) и глубины залегания истоковой и стоковой областей (b). Полученные результаты свидетельствуют о заметном влиянии данных параметров.

Закключение. Таким образом, в настоящей работе с помощью численного моделирования методом Монте-Карло электронного переноса проанализировано влияние длины проводящего канала, а также глубины залегания истоковой и стоковой областей в МОП-транзисторах с плавающим затвором на величину паразитного туннельного тока. Показано, что в рассматриваемых условиях это влияние существенно: с уменьшением данных параметров плотность паразитного туннельного тока увеличивается.

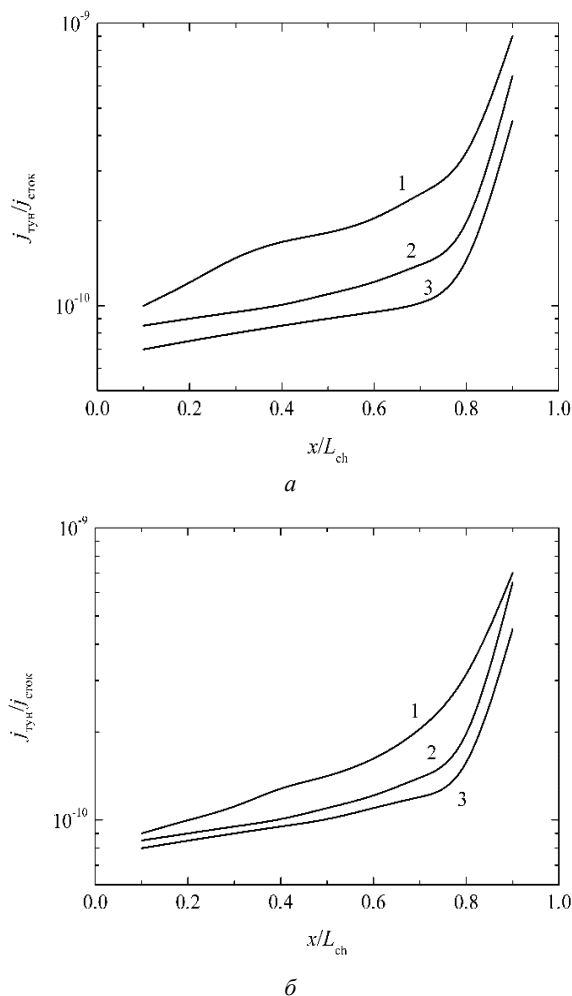


Рисунок 2 – Изменение вдоль канала относительной величины плотности туннельного тока: а) 1 – $L_{\text{ch}} = 0,1$ мкм, 2 – $L_{\text{ch}} = 0,2$ мкм, 3 – $L_{\text{ch}} = 0,3$ мкм; $d_j = 50$ нм; для б) 1 – $d_j = 10$ нм, 2 – $d_j = 50$ нм, 3 – $d_j = 100$ нм; $L_{\text{ch}} = 0,2$ мкм

Литература

1. Hu, C. Nonvolatile semiconductor memories: Technologies, design, and applications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1991. – 167 p.
2. De Salvo, B. Silicon Non-Volatile Memories: paths of innovation / B. De Salvo. – London : Wiley-ISTE Ltd, 2009. – 256 p.
3. Ghetti, A. Low-voltage hot electrons and soft programming lifetime prediction in nonvolatile memory cells / A. Ghetti, L. Selmi and R. Bez // IEEE Trans. Electron. Dev. – 1999. – Vol. 46, № 4. – P. 696–702.
4. Борздов, В. М. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники / В.М. Борздов, О.Г. Жевняк, Ф.Ф. Комаров, В.О. Галенчик. – Минск : БГУ, 2007. – 175 с.
5. 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. – Том. 1, № 12. – С. 58–61.

УДК 628.92

ВОЗМОЖНОСТЬ ИМИТАЦИИ ЕСТЕСТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ ВАРЬИРОВАНИЕМ ПАРАМЕТРОВ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Богдан П.С.¹, Зайцева Е.Г.¹, Степаненко А.И.², Чайкова Л.Д.¹¹Белорусский национальный технический университет²ООО «Технология и Медицина 20302»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Равенство координат цветности может иметь место для неодинаковых спектральных распределения светового излучения. Так как на состояние человека оказывает влияние спектральное распределение светового излучения в целом, при имитации естественного освещения необходимо обеспечивать не равенство световых координат искусственного и имитируемого естественного излучения, а равенство спектральных распределений.

Ключевые слова: координаты цветности, спектральное распределение светового излучения светодиодный источник излучения.

THE POSSIBILITY OF SIMULATING NATURAL LIGHTING BY VARYING THE PARAMETERS OF LED RADIATION SOURCES

Bogdan P.S.¹, Zaytseva E.G.¹, Stepanenko A.I.², Chaikova L.D.¹¹Belarusian National Technical University²LLC "Technology and Medicine 2030"

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Equality of chromaticity coordinates may occur for unequal spectral distributions of light radiation. Since the human condition is influenced by the spectral distribution of light radiation in general, when simulating natural lighting, it is necessary to ensure not equality of the light coordinates of artificial and simulated natural radiation, but equality of spectral distributions.

Key words: chromaticity coordinates, spectral distribution of light radiation, LED radiation source.

Адрес для переписки: Богдан П.С., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: pbogdan@bntu.by

Световая среда значительно влияет на здоровье человека. Образ жизни современного человека предусматривает необходимость длительного пребывания в условиях искусственного освещения или комбинации «искусственное – естественное освещение», которые вследствие технических особенностей источников излучения по своим спектральным и временным параметрам могут значительно отличаться от естественного. Это отличие может вызвать ухудшение состояния человека [1]. Поэтому актуальна задача создания систем искусственного освещения, имитирующих естественное.

К параметрам световой среды ее количественной оценки следует отнести мощность, ее спектральное распределение по длине волны излучения. Кроме того, спектральное распределение связано с различными системами координат цветности.

За счет особенностей зрительного восприятия зрительный анализатор человека в некоторых случаях не способен обнаруживать цветовые отличия в излучениях различного спектрального состава, т. е. оценивает изображения разного спектрального состава как имеющие один и тот же цвет. В соответствии с определением, предложенным Н.Д. Нюбергом, не отличимые человеком по цвету излучения можно назвать физиологически точными. У таких излучений имеет место равенство координат цветности [2] при разном спектральном составе.

Это утверждение иллюстрируется результатами проведенных экспериментов по измерению спектрального состава излучения и расчету цветных координат. На рисунках 1 и 2 представлены экспериментально полученные с помощью прибора *Oppl Light Master III* (светочувствительный диаметр 17 мм, относительная погрешность измерений 5 %, предел измерений 0–5000 лк) графики спектрального состава естественного излучения в разное время суток, которым соответствуют близкие значения координат цветности x и y .

Значения относительной разности координат x и y для случаев (а) и (б) для рисунков 1 и 2 приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения относительной разности координат x и y

№ рисунка	Относительная разность координат цветности, %	
	x	y
1	-1,22	0,63
2	0,92	1,85

Как следует из таблицы 1, отклонение цветных координат не превышает ± 2 %, что меньше погрешности прибора *Oppl Light Master III*. В тоже время графики (а) и (б) на рисунках 1 и 2 заметно отличаются.

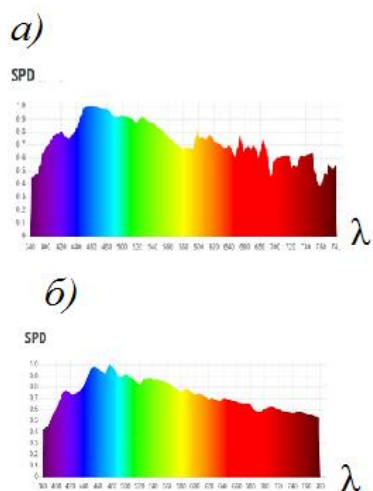


Рисунок 1 – Спектральное распределение мощности (SPD) естественного излучения: измерение 4.03.23 в 9.43, освещенность 5458 лк, $x = 0,3109$, $y = 0,318$, дождь (а) и измерение 09.03.23 в 11.51, освещенность 5007 лк, $x = 0,3147$, $y = 0,316$, небольшой снег

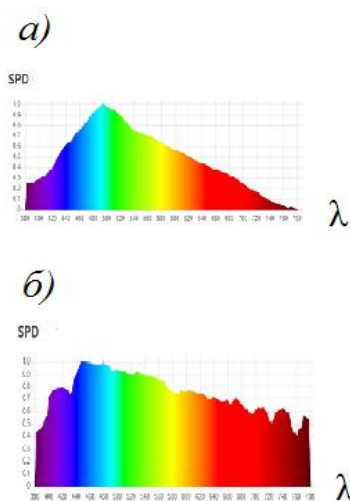


Рисунок 2 – Спектральное распределение мощности (SPD) естественного излучения: измерение 02.03.23 в 11.51, освещенность 10092 лк, $x = 0,3162$, $y = 0,325$, облачно (а) и измерение 16.03.23 в 12.48, освещенность 12290 лк, $x = 0,3133$, $y = 0,319$, пасмурно (б)

Световое излучение оказывает воздействие не только на зрительный анализатор человека [3], а на весь организм в целом [3; 4].

Отсюда очевидна необходимость обеспечивать в помещениях не физиологически точное по отношению к естественному излучению цветовоспроизведение (с условием равенства цветовых координат), а физически точное, которое в соответствии с классификацией Н.Д. Ньюберга подразумевает равенство спектров естественного излучения и излучения в помещении.

В этом случае условие имитации необходимого спектра естественного излучения имеет вид:

$$F(\lambda) = \sum_{j=1}^k a_j n_j p_j(i, \lambda) + F_{\text{ест}}(\lambda),$$

где $F(\lambda)$ – зависимость необходимых значений светового потока, имитирующего естественное освещение, от длины λ волны излучения; a_j и n_j – соответственно световая отдача и количество светодиодов j -той группы (синей, красной и т. д.); $p_j(i, \lambda)$ – зависимость мощности излучения светодиода j -той группы от тока питания i и длины λ волны излучения; $F_{\text{ест}}(\lambda)$ – зависимость значений светового потока естественного освещения, проникающего в помещение, от длины λ волны излучения.

Литература

1. Система и способ освещения: патент RU 2 584 674 С2 опубликовано: 20.05.2016.
2. Горбунова, Е.В. Колориметрия источников излучения / Е.В. Горбунова, А.Н. Чертов // СПб. : Университет ИТМО, 2015. – 126 с.
3. Ахметов, Э.М. Современные технологии профессионального образования: методологическое обеспечение исследования динамики параметров познавательной деятельности студентов, подверженных воздействию светодиодных источников / Э.М. Ахметов, Р.Р. Закиева // Педагогические науки. – 2019. – С. 36–41.
4. Лаврентьев, Б.Ф. Прибор цветотерапии / Б.Ф. Лаврентьев, В.В. Рожцов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 6 (часть 1). – С. 38–41.

УДК 530.182

ТОПОЛОГИЧЕСКИ НЕТРИВИАЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ АКСОНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ

Климович Т.А., Князев М.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Искусственный аксон представляет собой структуру, подобную нейрону. Такие объекты находят широкое применение для моделирования различных задач в области биофизики, например, при описании физиологических процессов. В работе в аналитической форме построено топологически нетривиальное решение этого уравнения, описывающее состояние типа одиночного кинка. Для этой цели был использован модифицированный прямой метод Хироты решения нелинейных уравнений в частных производных. Рассмотрены частные случаи, соответствующие различным значениям электрического напряжения на контактах аксона.

Ключевые слова: кинк, прямой метод Хироты.

TOPOLOGICALLY NONTRIVIAL AXON STATES AT DIFFERENT VOLTAGES

Klimovich T., Knyazev M.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. An artificial axon is a structure similar to a neuron. Such objects are widely used for modeling various problems in the field of biophysics, for example, when describing physiological processes. In the paper, a topologically nontrivial solution of this equation describing a single kink type state is constructed in an analytical form. For this purpose, a modified direct Hirota method for solving nonlinear partial differential equations was used. Special cases corresponding to different values of the electrical voltage at the axon contacts are considered.

Key words: kink, direct Hirota method.

Адрес для переписки: Климович Т.А., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: tanya.tatina.klimovich@mail.ru

Искусственный аксон представляет собой динамическую синтетическую структуру, функционирующую подобно нейрону, которая формируется за счет двойного фотоллипидного слоя, содержащего ионопроводящий канал, и использует электрический потенциал ионного градиента через мембрану в качестве источника энергии. Реально существующий аксон в отличие от искусственного содержит не один, а два ионопроводящих канала с градиентами в противоположных направлениях [1]. Искусственный аксон широко используется при моделировании биофизических задач [2], например, для описания в рамках теории Ходжкина-Хаксли [3] закономерностей протекания физиологических процессов.

В последнее время экспериментальному и теоретическому изучению искусственных аксонов уделяется значительное внимание. В работе [4] показана возможность формирования сети искусственных аксонов путем создания базовой единицы такой сети при помощи соединения двух возбуждаемых узлов так, что появление потенциала на одном из них индуцирует появление потенциала на другом. Те же авторы, продолжая свои экспериментальные исследования, показали, что использование двух искусственных аксонов в качестве элементов управления позволяет осуществлять перемещение к источнику света в

зависимости от скорости появления электрического потенциала [5].

Экспериментальное и теоретическое исследование порога появления напряжения на искусственном аксоне было проведено в работе [6]. Показано, что, как и для реального нейрона, это пороговое значение зависит от критической точки бифуркации седло-узел. В работе построена модель типа модели Морриса-Лекара, согласующаяся с полученными экспериментальными результатами. Из этой модели следует, что искусственный аксон может быть использован в качестве прерывателя протекания тока при изучении физиологических процессов.

В настоящей работе теоретически показано, что, наряду с решением в виде обычного кинка, уравнение движения для искусственного аксона допускает и новые кинкоподобные решения. Простейшее уравнение движения, описывающее динамику искусственного аксона, может быть записано в виде [7]:

$$V_t - V_{xx} - 4a[(1-\alpha)V + aV^2 - V^3] = 0, \quad (1)$$

где $V = V(x, t)$ – напряжение электрического поля внутри аксона, параметр $\alpha \leq 1$ определяется как отношение напряжения на контактах к потенциалу Нернста, α – параметр, определяющий

потенциальную энергию взаимодействия, $V_t = \partial V / \partial t$ и т. п.

Цель работы – построение в аналитической форме нового топологически нетривиального кинкоподобного решения уравнения полного (1), а также его частных случаев, соответствующих различным значениям параметров модели, и исследование возможных значений параметров решений.

Для решения уравнения (1) будем использовать прямой метод Хироты решения уравнений в частных производных [8], модифицированный согласно подходу, развитому в [9].

Запишем функцию F в виде формального ряда теории возмущений:

$$F(x, t) = 1 + \varepsilon f_1 + \varepsilon^2 f_2 + \varepsilon^3 f_3 + \dots, \quad (2)$$

где $f_i = f_i(x, t)$, $i = 1, 2, 3, \dots$ – новые неизвестные функции, ε – вообще говоря, не малый параметр. Подставляя соотношение (2) в уравнение (1) и приравнявая нулю коэффициенты при одинаковых степенях ε , получим бесконечную систему линейных уравнений в частных производных, такую, что каждое последующее уравнение этой системы будет зависеть только от параметров модели и решений предыдущих уравнений. Первое уравнение системы будет однородным, а все последующие – неоднородными.

Представляет интерес рассмотреть решения типа одиночного кинка для частных случаев $\alpha = 0$ и $\alpha = 1$.

Случай $\alpha = 0$ представляет скорее академический интерес, т. к. соответствует отсутствию напряжения на контактах аксона. При этом уравнение (1) записывается в виде

$$V_t - V_{xx} - 4aV + 4aV^3 = 0. \quad (3)$$

Аналогично тому, как это было сделано при построении решения типа одиночного Кинка для уравнения (1), получим решение в виде

$$V(x, t) = \frac{1}{2} \left[1 + \tanh \left(\frac{kx - \omega t + \eta^0}{2} \right) \right], \quad (4)$$

где $k^2 = 2a$ и $\omega = -6a$. Прямая подстановка соотношения (4) в уравнение (3) показывает, что оно является решением этого уравнения.

Случай $\alpha = 1$ соответствует максимально возможному напряжению на контактах аксона.

Уравнение (1) можно записать следующим образом

$$V_t - V_{xx} - 4aV^2 + 4aV^3 = 0. \quad (5)$$

По аналогии с предыдущими вычислениями получаем

$$V(x, t) = \frac{1}{2} \left[1 + \tanh \left(\frac{kx - \omega t + \eta^0}{2} \right) \right], \quad (6)$$

где $\omega = -k^2$ и $k = 2a\sigma$. Подстановка соотношения (6) в уравнение (5) показывает, что оно является решением этого уравнения.

Полученные в работе результаты согласуются с известными теоретическими исследованиями существования в искусственном аксоне солитоноподобных состояний типа кинков [10], а также с экспериментальными исследованиями формы кривой напряжения на контактах аксона [6]. Это можно рассматривать, как указание на возможность построения решения, соответствующего связанным состояниям двух кинков и/или антикинков. Для рассмотренных частных случаев решение, соответствующие связанным состояниям, построить не удается.

Литература

1. Ariyaratne, A. Towards a minimal artificial axon / A. Ariyaratne, G. Zocchi // J. Phys. Chem. B. – 2016. – Vol. 120, № 31. – P. 6255–6263
2. Koch, C. Biophysics of computation / C. Koch. – Oxford University Press, 1999. – 558 p.
3. Hodgkin, A.L. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve / A.L. Hodgkin, A.F. Huxley // The Journal of Physiology. – 1952. – Vol. 117, № 4. – P. 500–544.
4. Vasquez, H.G. Coincidences with the artificial axon [Electronic resource] / H.G. Vasquez, G. Zocchi. – Mode of access: <https://arXiv:physics.bio-ph/1708.01273>.
5. Vasquez, H.G. Analog control with two artificial axons. axon [Electronic resource] / H.G. Vasquez, G. Zocchi. – Mode of access: <https://arXiv:physics.bio-ph/1806.08000>.
6. Ziqi, P. Critical behavior of the artificial axon. axon [Electronic resource] / P. Ziqi, G. Zocchi. – Mode of access: <https://arXiv:physics.bio-ph/2012.0022>.
7. Chaikin, P. Principles of condensed matter physics / P. Chaikin, T. Lubenski. – Cambridge University Press, 1995. – 728 p.
8. Абловиц, М. Солитоны и метод обратной задачи рассеяния / М. Абловиц, Х. Сигур. – М. : Мир, 1987. – 479 с.
9. Князев, М. А. Кинки в скалярной модели с затуханием / М. А. Князев. – Минск : Тэхналогія, 2003. – 115 с.
10. Xinyi, Q. Kink propagation in the artificial axon. [Electronic resource] / Q. Xinyi, G. Zocchi. – Mode of access: <http://arXiv:cond-mat.soft/2108.06132>.

УДК 004.925.84

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЮВЕЛИРНЫХ УКРАШЕНИЙ В ПРОГРАММЕ BLENDER 3D

Кондратьева Н.А., Дудик С.А., Алексеенко Е.М.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрен пример практической реализации декоративной модели ювелирного украшения в пакете Blender 3D. Описаны возможности использования встроенных функций программного обеспечения Blender при создании и обработке модели ювелирного украшения – кольца.

Ключевые слова: 3D-моделирование, программное обеспечение Blender, ювелирные украшения, декоративная модель.

MODELING OF JEWELRY IN THE BLENDER 3D PROGRAM

Kondratieva N.A., Dudik S.A., Alekseenko E.M.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. An example of the practical implementation of a decorative jewelry model in the Blender 3D package is considered. The possibilities of using the built-in functions of the Blender software when creating and processing a ring jewelry model are described.

Key words: 3D modeling, Blender software, jewelry, decorative model.

*Адрес для переписки: Кондратьева Н.А., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: kondratyeva@bntu.by*

Процесс создания ювелирных украшений от задумки до превращения в полноценную модель может оказаться трудоемким и, порой того не стоящим, так как представляя лишь образ будущего украшения в голове, воссоздание четкого изображения в реальности может оказаться просто невозможным. В век высоких технологий появилась операция, находящаяся между стадиями «идея» и «мастерское воплощение». Эта операция в ювелирном деле представляет собой процесс создания декоративной модели в пакетах 3D моделирования. Она позволяет четко увидеть будущую форму, со всеми ее особенностями и узнать, какую работу нужно выполнить ювелиру для превращения декоративной модели в жизнь.

Blender – бесплатное программное обеспечение для создания и редактирования трехмерных изображений, визуализации, скульптинга, анимации и даже создание компьютерных игр. Благодаря своему набору инструментов *Blender* является универсальной программой для 3D моделирования.

Для создания качественного и ценного ювелирного украшения необходимо проектировать не только его внешний вид, но и структуру. Если работать с материалом (металлом, сплавом и др.) и придавать ему определенную форму, нужно понимать каким способом возможна обработка, чтобы подчеркнуть его выгодные стороны. Чаще всего ювелирные украшения имеют сложную форму и заданный вид огранки драгоценного камня. Это дуэт различных материалов с декоративными камнями. Ювелиром обязательно учитывается следующее:

– совместимость камня с материалом (будут ли они дополнять качества друг друга);

– форма камня (какая огранка камня, если она нужна, будет подчеркивать его главные качества (блеск, прозрачность, сияние и др.);

– способ закрепки камня в ювелирном изделии (насколько надежным будет закреп и как будет смотреться камень в ней) и другое.

Имея в виду перечисленные нюансы предварительно, с помощью компьютерного моделирования, создается 3D модель ювелирного украшения.

Например, модель может иметь сочетание камней с золотом и глухую закрепку камня. «Солнечный металл» не теряет актуальности многие столетия и оптимальными для инкрустации в золото теплых оттенков будут следующие камни: бриллиант, шпинель, рубин (и некоторые другие красные камни), бирюза, желтый сапфир, янтарь (и другие желтые камни), гиацинт, хризолит. Золото – крайне активный металл. Лучше всего для него подойдут прозрачные или полупрозрачные минералы теплых оттенков или совершенно бесцветные. Очень насыщенные по цвету камни – такие, как гранат и красная яшма – не рекомендуется сочетать с желтым золотом. Не слишком подходят для этих целей также нефрит, морион, аметист и изумруд [1].

Говоря о виде закрепки камня, нужно рассматривать плюсы и минусы используемой. В данном случае, глухая закрепка это один из популярных дизайнов. Этот вид закрепки заключается в креплении бриллианта или любого драгоценного камня полоской металла, которая как бы оборачивается вокруг камня.

Существуют две разновидности глухой или как еще ее называют ободковой закрепки – полная глухая закрепка и частичная ободковая закрепка.

Полная глухая закрепка окружает сплошь камень, по всей окружности. Этот тип закрепки является самым надежным, но он также скрывает значительную часть камня. Частичная глухая закрепка скрывает весь камень по кругу – она оставляет его стороны видимыми. Части камня, которые не закреплены ободом подвергаются потенциальным угрозам, падениям и ударам, которые могут нанести ущерб камню, но при этом большая часть бриллианта или драгоценного камня остается видимой по сравнению с глухой.

Ювелиры выделяют преимущества: глухая закрепка обеспечивает значительно большую безопасность в сравнении с крапановой закрепкой. Камень хорошо защищен и имеет меньше шансов получить повреждения при носке. Наблюдаются и недостатки: глухая закрепка скрывает больше камня по сравнению с крапановой закрепкой. Поэтому при моделировании ювелирного украшения, например, с бриллиантом, инженер-технолог ювелирного производства должен решить, что важнее: безопасность или видимость камня [2].

Рассмотрим практическую реализацию декоративной модели ювелирного украшения в пакете *Blender 3D*. Создание модели ювелирного украшения – кольца, в пакете 3D моделирования *Blender* начинается с добавления плоскости. Использование модификатора «Винт» позволяет получить начальную форму кольца. Чтобы придать объем форме допустимо использовать «Экструдирование участка» по оси *Y* [3]. Для уменьшения толщины выделяется внутренняя часть кольца и применяется инструмент «Перемещение» по оси *X*. Выполнено моделирование кольца-поцелуйчика и задана характерная форма шинки. Место для камней создается с помощью двух половинок сферы. На рисунке 1 показано, как выполняется добавление объема закрепке. Этот этап происходит при помощи модификатора «Объемность», а сглаживание поверхности – за счет модификатора «Подразделение поверхности».

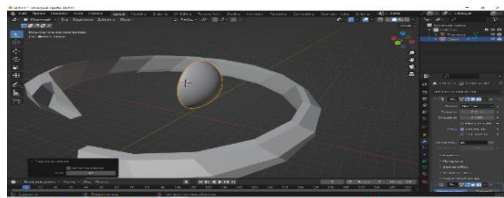


Рисунок 1 – Закрепка

На рисунке 2 продемонстрировано использование модификаторов «Подразделение поверхности» и «Логический». Создается гладкость поверхности шинки и соединяются составные части кольца воедино.

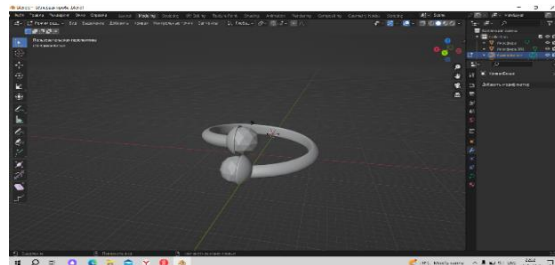


Рисунок 2 – Соединение частей

Последним этапом моделирования (рисунок 3) становится наложение текстур на модель и выполнение постановки света.

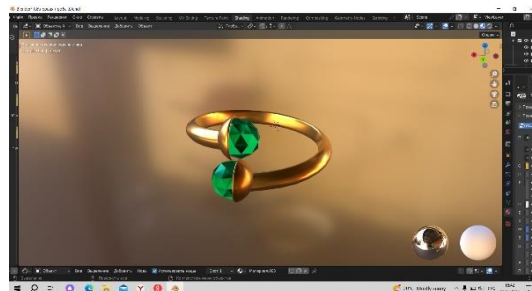


Рисунок 3 – Наложение текстур

Моделирование ювелирного украшения – кольца, в пакете *Blender 3D* позволяет экспериментировать с видом огранки и закрепки камня, формой шинки и выбором материалов, изменять цвет, многократно преобразовывать форму объектов, применять различные эффекты (рисунок 4).



Рисунок 4 – Моделирование изделия

Компьютерное моделирование позволяет за короткий срок рассмотреть большое количество различных видовых комбинаций, ускоряет процесс поиска оптимального расположения элементов. После вышеописанного процесса создания 3D модели украшения ее можно распечатать на 3D принтере из полимера.

Литература

1. Сочетание камней с золотом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://jewellerymag.ru/p/stones-and-metals>.
2. Виды закрепок камней [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://typicaljeweler.com/news/gid_povidam_uelimih_zakrepe.
3. Кронистер Дж. Основы Blender. Учебное пособие. 4-е издание. – Blender-сообщество, 2011. – 416 с.

УДК 538.9+539.23

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ TiAlSiN, TiAlSiCN ДЛЯ ЗАДАЧ КОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**Константинов С.В.¹, Комаров Ф.Ф.¹, Чижов И.В.², Зайков В.А.²**¹НИИУ «Институт прикладной физический проблем им. А.Н. Севченко» БГУ,²Белорусский государственный университет,

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Сформированы образцы нитридных и карбонитридных покрытий TiAlSiN, TiAlSiCN. Проведены измерения поверхностного R_{\square} и удельного $R_{уд}$ сопротивления нитридных и карбонитридных покрытий TiAlSiN, TiAlSiCN четырехзондовым методом при помощи цифрового прибора ИУС-3. Установлено, что все сформированные покрытия нитрида TiAlSiN и карбонитрида TiAlSiN с добавлением кремния Si имеют небольшие значения поверхностных сопротивлений $R_{\square} = 4,2-37,5 \text{ Ом}/\square$ и являются проводящими. Сформированные методом реактивного магнетронного напыления покрытия могут использоваться в качестве износостойких электропроводящих покрытий в авиационном и космическом приборостроении.

Ключевые слова: удельное сопротивление, поверхностное сопротивление, нитриды, карбонитриды, электропроводность.

ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF NANOSTRUCTURED TiAlSiN, TiAlSiCN COATINGS FOR SPACE INSTRUMENTATION PROBLEMS**Stanislav V. Konstantinov¹, Fadei F. Komarov¹, Igor V. Chizhov², Valery A. Zaikov²**¹A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University,

Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Samples of nitride and carbonitride TiAlSiN, TiAlSiCN coatings were formed. The surface R_{\square} and specific ρ resistivity of nitride and carbonitride coatings TiAlSiN, TiAlSiCN were measured by the fourprobe method using the IUS-3 digital device. It was found that all formed coatings of TiAlSiN nitride and TiAlSiN carbonitride with the addition of silicon Si are conductive and have small values of surface resistances $R_{\square} = 4.2-37.5 \text{ Ohms}/\square$. Coatings formed by the method of reactive magnetron sputtering can be used as wear-resistant electrically conductive coatings in aviation and space instrumentation.

Key words: resistivity, surface resistance, nitrides, carbonitrides, electrical conductivity.

Адрес для переписки: Константинов С.В., ул. Курчатова 7, г. Минск, 220045, Республика Беларусь

e-mail: svkonstantinow@gmail.com mymail3000@tut.by

Введение. Создание современных приборов с повышенными прочностными характеристиками, в том числе для космической и авиационной техники, требуют разработки принципиально новых материалов с уникальными свойствами [1].

Прочные покрытия на основе нитрида титана обладают высокой твердостью и устойчивостью к деформации [2]. Обладая хорошей электропроводностью данные покрытия позволят создать износостойкие токопроводящие механизмы и узлы для приборов и механизмов функционирующих в тяжелых условиях космического пространства.

Материалы и методы исследования. Формирование покрытий TiAlSiN и TiAlSiCN осуществлялось методом реактивного магнетронного распыления [2; 3] при различных режимах нанесения.

Поверхностное сопротивление покрытий измерялось четырехзондовым методом при помощи цифрового прибора ИУС-3. Измерения производились в центре образца при комнатной температуре. Определение значения поверхностного сопротивления образца производилось несколькими сериями, в каждой серии производилось по 10 измерений, для получения усредненного значения.

После серии измерений, изменялось положение измерительных зондов на поверхности образца и производилась следующая серия измерений.

Поверхностное сопротивление R_{\square} определяется из выражения:

$$R_{\square} = 4,53U / I, \quad (1)$$

где I – ток, пропускаемый через два внешних зонда (для измерений выбирался рабочий ток $I = 20 \text{ мА}$); U – напряжение, измеряемое между двумя внутренними зондами с помощью вольтметра с высоким входным сопротивлением.

При известных толщинах покрытий и значениях их поверхностного сопротивления можно определить удельное сопротивление $R_{уд}$ по формуле:

$$R_{уд} = R_{\square}h, \quad (2)$$

где h – толщина пленки.

Покрытия наносились на подложки из ситалла, оксида кремния SiO_2 , обладающие высоким удельным сопротивлением, для нивелирования эффекта шунтирования исследуемых пленок.

Результаты и их обсуждение. В таблице 1 представлены средние значения поверхностного

сопротивления, толщина сформированных наноструктур и значения удельного сопротивления нитридных TiAlSiN и карбонитридных TiAlSiCN покрытий. Удельное сопротивление $R_{уд}$ покрытий варьируется в диапазоне 0,51–42,6 мОм. Влияние материала подложки на измеренное сопротивление незначительно.

Полученные покрытия обладают низким сопротивлением и являются электропроводящими. Не обнаружено значительного влияния градиентного адгезионного подслоя на сопротивление покрытий. Поверхностное сопротивление на подложке из ситалла и оксида кремния SiO₂ отличается незначительно (на ≈13 %).

Таблица 1. Усредненные значения поверхностного сопротивления карбонитридного покрытия TiAlSiCN и нитридного покрытия TiAlSiN на подложках из ситалла и оксида кремния SiO₂

Подложка	Ситалл		SiO ₂	
	R_{\square} , Ом/□	$R_{уд}$, мОм·см	R_{\square} , Ом/□	$R_{уд}$, мОм·см
1N1.30	–	–	21,1	15,4
1N1.30 gr	21,0	15,3	23,8	17,3
1N1.32	–	–	28,9	21,9
1N1.32 gr	30,2	22,9	30,6	23,2
2N1.30	35,4	40,2	37,5	42,6
2N2.34	7,5	0,92	–	–
2CN1.30	7,2	16,8	–	–
2CN1.30 gr.	10,2	23,6	7,3	17,0
2CN2.33	4,2	0,51	–	–
2CN2.33 gr.	4,6	0,56	–	–

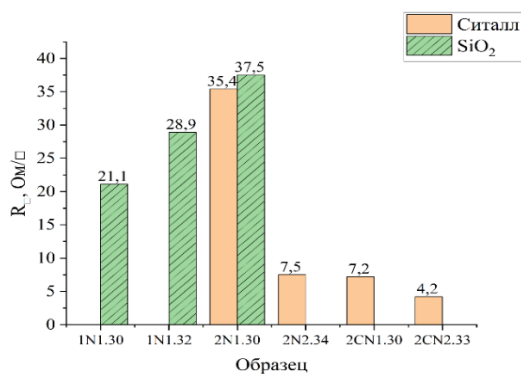


Рисунок 1 – Показатели поверхностного сопротивления R_{\square} покрытий без адгезионного подслоя на подложках из ситалла и оксида кремния SiO₂

Показатели поверхностного сопротивления покрытий без градиентного адгезионного подслоя на подложках из ситалла и оксида кремния SiO₂ показаны на рисунке 1. Минимальное значение поверхностного сопротивления R_{\square} демонстрирует образец 2CN2.33 (4,2 Ом/□). Максимальное значение обнаружено у образца 2N1.30 на подложке из оксида кремния SiO₂ (37,5 Ом/□). Чем выше доля металла в составе покрытия (Ti+Al ат %), тем ниже поверхностное сопротивление покрытия.

Заключение. Установлено, что все сформированные покрытия нитрида TiAlSiN и карбонитрида TiAlSiCN с добавлением кремния Si имеют небольшие значения поверхностных сопротивлений $R_{\square} = 4,2–37,5$ Ом/□ и являются проводящими, демонстрируя металлическую природу проводимости. Выявлено, что чем выше доля металла в составе покрытия (Ti + Al, ат. %), тем ниже сопротивление получаемой структуры. Наименьшие значения сопротивлений ($R_{\square} = 4,2$ Ом/□, $R_{уд} = 0,51$ мОм·см) наблюдались у образца 2CN2.33 с наибольшей концентрацией металлов титана Ti и алюминия Al в составе. Формирование градиентного адгезионного подслоя не оказывает значительного влияния на поверхностное сопротивление нитридных и карбонитридных пленок. Сформированные покрытия могут найти применение в качестве электропроводящих структур, обладающих механической и химической стойкостью и являются пригодными для применения в авиационном и космическом приборостроении.

Литература

- Новиков, Л.С. Космическое материаловедение : учебное пособие / Л.С. Новиков. – М. : Макс Пресс, 2014. – 448 с.
- Структура и микромеханические свойства покрытий TiAlSiN, TiAlSiCN сформированных методом реактивного магнетронного распыления / Ф.Ф. Комаров [и др.] // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук. – 2023. – Т. 59, № 3. – С. 241–252.
- Nanostructured TiAlCuN and TiAlCuCN coatings for spacecraft: effects of reactive magnetron deposition regimes and compositions / F.F. Komarov [et al.] // RSC Adv. – 2023. – № 13. – P. 18898–18907.

УДК 629.78.06

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ТЕПЛОТВОДЯЩИХ СВОЙСТВ КОЛЬЦЕВЫХ РЕБЕР С ГИПЕРБОЛИЧЕСКИМ ПРОФИЛЕМ

Кот В.А.

*Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Предложен новый высокоточный метод расчета теплоотводящей способности кольцевых ребер с гиперболическим профилем.

Ключевые слова: теплообмен, гиперболическое кольцевое ребро, эффективность ребра.

COMBINED METHOD OF CALCULATING THE HEAT-TRANSFER PROPERTIES OF ANNULAR FINS WITH A HYPERBOLIC PROFILE

Kot V.

*A.V. Luikov Institute of Heat and Mass Transfer, National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. A new highly exact method of calculating the heat-conduction ability of annular fins with a hyperbolic profile is proposed.

Key words: heat transfer, hyperbolic annular fin, fin efficiency.

*Адрес для переписки: Кот В.А., ул. П. Бровки, 15, г. Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: v.kot@hmti.ac.by*

В настоящее время теплообменные устройства становятся все более сложными и постоянно требуют адекватных размеров, повышенной надежности и длительных сроков службы [1–4]. В этом отношении кольцевые ребра гиперболического профиля оказываются наиболее перспективными ребрами, прикрепляемым к круглым трубкам, поскольку они сильно напоминают оптимальные кольцевые ребра с выпуклым параболическим профилем. Последние стали основными в теплообменных устройствах из-за их уникальной способности максимально отводить тепло при заданном объеме материала [1–4]. Изменение температуры вдоль кольцевого ребра гиперболического профиля описывается двучленным дифференциальным уравнением второго порядка с переменным коэффициентом. Данное дифференциальное уравнение подпадает под категорию обобщенного уравнения Бесселя. Хотя оно и допускает точное аналитическое решение, но имеет сложную форму ввиду присутствия модифицированных функций Бесселя дробного порядка. Следовательно, численная оценка температур и/или скоростей теплопередачи остается довольно сложной и трудоемкой задачей. В настоящей работе рассматривается новый комбинированный интегральный метод в виде альтернативной вычислительной процедуры получения приближенного решения краевой задачи с оценкой основных свойств ребра.

Постановка задачи. Согласно [3] гиперболический профиль ребра (рисунок 1) представляется благоприятным ввиду его аналогии с ребром с выпуклым параболическим профилем, который, как известно, обладает максимальной способностью к теплоотдаче для заданного объема (веса) материала.

Изменение температуры вдоль кольцевого ребра гиперболического профиля подчиняется безразмерному уравнению [5]:

$$d^2\theta/dR^2 - M^2R\theta = 0 \quad (1)$$

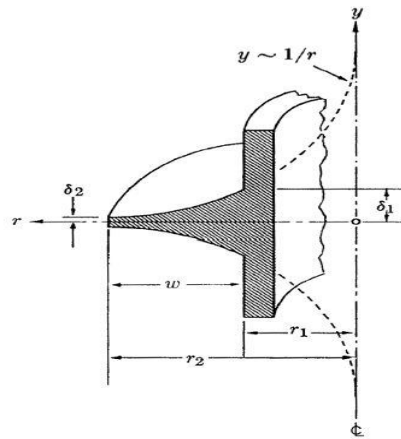


Рисунок 1 – Эскиз кольцевого ребра гиперболического профиля [5]

при соблюдении граничных условий заданной температуры у основания ребра

$$\theta = 1, \quad R = c \quad (2)$$

с пренебрежением потерь тепла на краю ребра

$$d\theta/dR = 0, \quad R = 1, \quad (3)$$

где $\theta = (T - T_\infty)/(T_b - T_\infty)$, $M^2 = hr_2^3/(k\delta_1r_1)$, $R = r/r_2$. Интенсивность теплоотдачи ребра в жидкость вычисляется посредством параметра

$$\eta = Q/Q_{ideal} \quad (4)$$

по формуле

$$\eta = -2(d\theta/dR)_{R=c}/[M^2(1 - c^2)]. \quad (5)$$

Точное аналитическое решение. Общее решение уравнения Эйри (1) имеет вид [6]

$$\theta(R) = C_1Ai(M^{2/3}R) + C_2Bi(M^{2/3}R), \quad (6)$$

где $Ai(*)$ и $Bi(*)$ – функции Эйри [6]. В частном случае решением является [5; 6]

$$\theta(R) = \sqrt{\frac{R^{1/3} \left(\frac{2m}{3\sqrt{c}} R^{3/2} \right) I_{2/3} \left(\frac{2m}{3\sqrt{c}} \right) - L_{-1/3} \left(\frac{2m}{3\sqrt{c}} R^{3/2} \right) I_{-2/3} \left(\frac{2m}{3\sqrt{c}} \right)}{I_{1/3} \left(\frac{2m}{3\sqrt{c}} \right) I_{2/3} \left(\frac{2m}{3\sqrt{c}} \right) - L_{-1/3} \left(\frac{2m}{3\sqrt{c}} \right) I_{-2/3} \left(\frac{2m}{3\sqrt{c}} \right)}} \quad (7)$$

Здесь $I_\nu(\cdot)$ обозначает модифицированные функции Бесселя первого рода порядка ν , $m^2 = M^2/c$. Согласно (7) точная формула расчета эффективности ребра имеет вид

$$\eta = \frac{2c^{3/2}}{m(1-c^2)} \frac{L_{-2/3} \left(\frac{2m}{3} c \right) I_{2/3} \left(\frac{2m}{3\sqrt{c}} \right) - I_{2/3} \left(\frac{2m}{3} c \right) L_{-2/3} \left(\frac{2m}{3\sqrt{c}} \right)}{L_{-1/3} \left(\frac{2m}{3} c \right) I_{-2/3} \left(\frac{2m}{3\sqrt{c}} \right) - I_{-1/3} \left(\frac{2m}{3} c \right) I_{2/3} \left(\frac{2m}{3\sqrt{c}} \right)} \quad (8)$$

Приближенное аналитическое решение. Представим функцию $\theta(R)$ полиномом

$$\theta(R) = 1 + A(R - c) + B(R - c)^2 + C(R - c)^3. \quad (9)$$

Из граничных условий (2) и (3) для (9) определяем коэффициенты B и C , что дает

$$\theta(R) = 1 + A(R - c) + [3(b - 1) - 2(1 - c)A] \left(\frac{R - c}{1 - c} \right)^2 - [2(b - 1) - (1 - c)A] \left(\frac{R - c}{1 - c} \right)^3 \quad (10)$$

Введем дополнительные («избыточные») граничные условия, определив их как

$$\theta(1) = b, \quad (d\theta/dR)_{R=c} = A. \quad (11)$$

Для нахождения b и A поступим следующим образом: проинтегрируем уравнение (1), а также проинтегрируем его с весом $(R - c)$. После некоторых преобразований и решения системы двух логарифмических уравнений находим:

$$A = -\frac{60M^2[30(1 - c^2) + (1 - c)^3(1 + 4c + c^2)M^2]}{3600 + 120(1 - c)^2(9 + 4c)M^2 + (1 - c)^4(11 + 28c + 6c^2)M^4}, \quad (12)$$

$$b = \frac{3600 - 120(1 - c)^2(1 + c)M^2 + (1 - c)^4(1 + 8c + 6c^2)M^4}{3600 + 120(1 - c)^2(9 + 4c)M^2 + (1 - c)^4(11 + 28c + 6c^2)M^4}. \quad (13)$$

Результаты расчета на основе точной (7) и приближенной (10) формул представлены на рисунке 2. Отмечаем практически полное слияние температурных графиков.

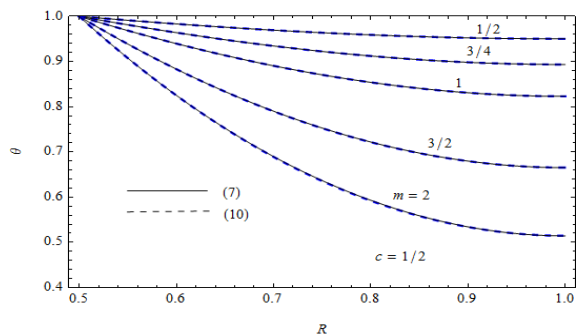


Рисунок 2 – Температурные профили в ребре

Из (5), (11) и (12) получаем очень простую формулу расчета параметра η , который характеризует теплоотводящую способность

(эффективность) радиального ребра, имеющего гиперболический профиль:

$$\eta = \frac{30 + (1 - c)^2(1 + 4c + c^2) \frac{m^2}{c(1 + c)}}{30 + (1 - c)^2(9 + 4c) \frac{m^2}{c} + (1 - c)^4(11 + 28c + 6c^2) \frac{m^4}{120c^2}} \quad (14)$$

Кривые зависимости параметра $\eta(m)$, рассчитанного по точной формуле (8) и приближенной формуле (14), представлены на рисунке 3. Мы можем констатировать их практически полное слияние. В случае $c = 0,5$ и $m = 0,5$ расчет эффективности кольцевого гиперболического ребра по формуле (14) дает относительную ошибку всего 0,0003 %.

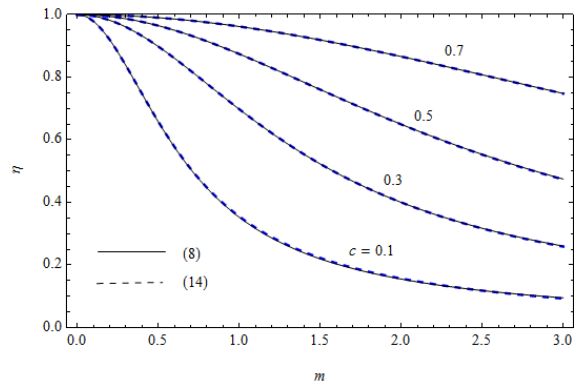


Рисунок 3 – Зависимость теплоотводящей эффективности ребра от параметра m

Заключение. Предложенный нами интегральный комбинированный метод открыл неожиданный и простой путь для высокоточного расчета (с помощью калькулятора) распределения температуры вдоль кольцевых гиперболических ребер, а также в расчете эффективности их охлаждающей способности, полностью исключив при этом «неудобные» модифицированные функции Бесселя. Данную методологию можно распространить на все иные кольцевые охлаждающие ребра с переменным профилем: треугольным, вогнутым параболическим, выпуклым параболическим и выпуклым гиперболическим.

Литература

1. Kraus, A.D. Extended Surface Heat Transfer / A.D. Kraus, A. Aziz, J.R. Welty. – Wiley, NY, 2001.
2. Webb, R.L. Principles of Enhanced Heat Transfer / R.L. Webb. – Wiley Interscience, New York, 1994.
3. Janna W. Engineering Heat Transfer / W. Janna. – CRC Press, Boca Raton, 2008.
4. Wolf, H. Heat Transfer / H. Wolf. – Harper & Row Limited, New York, 1983.
5. Schneider, P.J. Conduction Heat Transfer / P.J. Schneider. – Addison-Wesley, Reading, MA, 1955.
6. Abramowitz, M. Handbook of Mathematical Functions / M. Abramowitz, A. Stegun. – United States Government Printing Office, Washington, 1964.

УДК 678.057.9

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРЕДИЗОЛИРОВАННЫХ ТРУБ

Ксенофонтов М.А., Васильева В.С., Выдумчик С.В., Павлюкевич Т.Г., Понарядов В.В.

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

Аннотация. В работе представлена заливочно-смесительная установка низкого давления, применяемая для подготовки, смешения, высокоточного дозирования и производства из двухкомпонентных пенополиуретановых систем теплоизолирующего слоя, входящего в многослойную конструкцию предизолированных гибких труб, получаемых непрерывным способом. Установка воплощает в себе современные научные, инженерные решения и является универсальным оборудованием, а благодаря автоматизации технологического процесса позволяет получать качественные изделия с заданными физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Ключевые слова: универсальное автоматизированное оборудование, полимерные системы, теплоизолирующий слой, гибкие предизолированные трубы.

TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR CONTINUOUS PRODUCTION OF PRE-INSULATED PIPES

Ksenofontov M.A., Vasilyeva V.S., Vy dumchik S.V., Pavlyukevich T.G. Ponaryadov V.V.

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

Abstract. The work presents a low-pressure pouring and mixing installation used for preparation, mixing, high-precision dosing and production of a heat-insulating layer from two-component polyurethane foam systems, which is part of the multilayer structure of pre-insulated flexible pipes produced by a continuous process. The installation embodies modern scientific and engineering solutions and is a universal equipment, and thanks to the automation of the technological process, it allows us to obtain high-quality products with specified physical, mechanical and operational properties.

Key words: universal automated equipment, polymer systems, heat-insulating layer, flexible pre-insulated pipes.

Адрес для переписки: Ксенофонтов М.А., ул. Курчатова, 7, г. Минск, 220045, Республика Беларусь
e-mail: lab_doзатор@mail.ru

Использование качественных комплектующих и гибких предизолированных труб для теплосетей является гарантией длительной эксплуатации коммуникаций, а квалифицированный монтаж с соблюдением технологии обеспечивает безупречную работу теплосети на долгий срок без потребности в ремонте.

Гибкие предизолированные трубы представляют собой многослойную конструкцию с применением теплоизоляции из вспененного полиуретана (рисунок 1).



Рисунок 1 – Гибкие предизолированные трубы

Трубы изготавливаются в течение непрерывного технологического процесса, благодаря чему каждый из слоев имеет прочное физическое сцепление с соседними слоями, а устойчивость к пагубному воздействию различных химреактивов и агрессивной среды обеспечивает увеличение сферы применения таких конструкций.

Разработанное нами оборудование характеризуется модульной конструкцией узлов. Благодаря данной особенности машина конфигурируется в индивидуальном порядке, в строгом соответствии с производственными задачами конкретного предприятия.

В основу работы установки положен принцип непрерывной подачи дозированного количества двух жидких компонентов (полиэфира и изоцианата) в смесительную головку с динамическим перемешиванием. Процесс смешения компонентов осуществляется в проточной малогабаритной смесительной камере за счет механической энергии, благодаря высокой скорости вращения смесительного элемента (ротора).

В состав автоматизированного оборудования (рисунок 2) входят следующие основные функциональные узлы: емкости для компонентов и очистителя, дозирующие узлы компонентов, поворотная стойка с закрепленным на ней смесительным устройством, системы управления (для управления работой установки во всем диапазоне функциональных режимов), термостатирования (для подогрева и поддержания заданной температуры компонентов, находящихся в рабочих емкостях), очистки смесительной камеры (обеспечивает автоматическое удаление жидких остатков смеси из смесительной камеры после выполнения

заливок) и автоматической дозаправки компонентов (обеспечивает подкачку компонентов из транспортной тары (бочка 200 л) в расходные емкости), комплектов пневмо- и электрооборудования.



Рисунок 2 – Заливочно-смесительная установка низкого давления для получения теплоизолирующего слоя из пенополиуретановых систем

Смесительное устройство, дозаторы и автоматизированная система управления – собственные разработки. Смесительное устройство машины отличается уникальным конструктивным исполнением, благодаря чему достигается высокое качество смешения компонентов, а современная система управления дозирующими насосами гарантирует точное поддержание производительности и соотношения компонентов.

Пенополиуретановые системы оснащаются современными дозирующими насосами с частотно-регулируемыми приводами, что обеспечивает отличное качество смешения. Для контроля и корректировки расхода пенополиуретановой системы в линиях подачи установлены расходомеры, обеспечивающие точное измерение объемного расхода компонента.

Наличие удобной и технологичной системы управления на основе современного промышленного компьютера с сенсорным дисплеем 15" дает возможность программировать посредством команд и заранее подготовленных шаблонов. Все элементы комплектации шкафа управления, датчики и двигатели имеют унифицированные к международным стандартам конструкцию и типы сигналов.

Программа управления установкой «*NIPFP dosing-mixing*» предназначена для управления и мониторинга состояния заливочно-смесительной установки. Программа выполняется на персональном компьютере под управлением ОС *Windows* версии от *XP* до *Windows 10*. Требования к быстродействию процессора и объему па-

мяти минимальны. Программа не требует установки и может выполняться с любого накопителя. Единственным требованием к компьютеру является наличие папки *C:\NIPFPFiles* в корневом каталоге диска *C*. Установка имеет два основных режима – «Настройка» и «Работа».

В основном экране также расположено окно вывода сообщений журнала событий. В журнале содержатся записи событий, проблем и неисправностей, времени их возникновения, код и описание события. Данные журнала содержатся в файле *C:\NIPFPFiles\UK2\LogFile.TXT*, просмотр журнала в этом расширении доступен в текстовом редакторе – Блокнот (*notepad.exe*). Также для просмотра журнала можно использовать нашу специализированную программу «*Journal.exe*», которая находится в папке *C:\NIPFPFiles* корневого каталога диска *C*.

Центральным узлом системы управления установкой является специализированный контроллер. Контроллер постоянно проводит диагностику составных частей установки и помещает актуальную информацию о состоянии в массив данных, передаваемых в персональный компьютер. В данной конфигурации контроллер является подчиненным устройством. Кроме сбора и отправки информации контроллер автоматически блокирует работу приводов насосов при обнаружении превышения давления компонентов в напорных магистралях, контролирует количество очистителя через тензодатчик, генерирует сигналы управления сервоприводами, обрабатывает сигналы с расходомеров. Вся остальная логика работы установки реализована на ПК.

Для световой и звуковой сигнализации установка оборудована световой колонной, которая подает разрешительные или запрещающие световые сигналы и предупреждения персоналу об аварийных и чрезвычайных ситуациях связанных с безопасной работой оборудования.

Все узлы оборудования смонтированы на общей раме, обеспечивая компактный дизайн и возможность размещения в небольшом помещении. Для удобства перемещения по цеху ручную установку имеет опорные катки с интегрированным тормозом.

Разработанное нами оборудование характеризуется надежностью работы, универсальностью, максимальной производительностью, современным уровнем автоматизации, хорошим качеством изготавливаемой продукции и конкурентной стоимостью.

УДК 620.179.14

ВОЗМОЖНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МНОГОПАРАМЕТРОВЫХ МОДЕЛЕЙ**Кулагин В.Н., Пиунов В.Д., Осипов А.А.***ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»**Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Исследованы возможные особенности многопараметровых моделей и выпускаемых предприятиями изделий. Даны рекомендации по увеличению точности определения контролируемых величин, а также повышению надежности выпускаемой продукции.

Ключевые слова: магнитный метод, неразрушающий контроль, точность измерения магнитных характеристик.

POSSIBLE FEATURES OF MULTI-PARAMETER MODELS**Kulagin V.N., Osipov A.A., Piunov V.D.***The State Scientific Institution "Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus"**Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Possible features of multi-parameter models and products manufactured by enterprises have been studied. Recommendations are given to increase the accuracy of determining controlled quantities, as well as to improve the reliability of manufactured products.

Key words: magnetic method, non-destructive testing, accuracy of measuring magnetic characteristics

*Адрес для переписки: Осипов А.А., ул. Академическая, 16, г. Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: osipov@iapb.bas-net.by*

Надежность используемого в производстве оборудования является необходимым условием работы современных предприятий безаварийно. Зачастую сама надежность оборудования обусловлена или определяется множеством разнообразных факторов.

Объективное и всестороннее изучение влияния каждого из факторов требует больших финансовых вложений, времени, использования специального оборудования, больших трудозатрат и т. д.

Более просто оценить и изучить возможные трудности, причем лучше на математических моделях, описывающих используемые в производстве объекты. Разумеется, выбранная модель должна максимально адекватно, а еще надежней в деталях, описывать имитируемый объект.

Подобные простейшие модели могут представлять собой линейные уравнения вида

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^p b_j x_j, \quad (1)$$

где b_j – коэффициенты многопараметровой модели, y – зависимые переменные, x_j – независимые переменные данной многопараметровой модели.

Из (1) с учетом, например, только мультипликативных ошибок независимых переменных δ_j следует уравнение для мультипликативной ошибки δ_y зависимой переменной выбранной линейной модели [1; 2]

$$\delta_y = \sum_{j=1}^p (b_j x_j / y) \delta_j = \sum_{i=1}^p K_i \delta_i, \quad (2)$$

где K_j – коэффициенты значимости мультипликативных ошибок δ_j независимых переменных.

За основу возьмем, как и в [3], некоторые многопараметровые модели, которые предложены авторами [4]. При расчетах коэффициентов модели (1) используются экспериментальные данные из монографии [5].

Согласно [3; 4] независимыми переменными являются следующие известные магнитные характеристики, а также их комбинации: коэрцитивная сила H_c ; релаксационная намагниченность M_{H_r} ; релаксационная магнитная восприимчивость $\chi_r = M_{H_r} / H_r$; квадрат коэрцитивной силы H_c^2 ; квадрат релаксационной намагниченности $M_{H_r}^2$; произведение релаксационной магнитной восприимчивости на релаксационную намагниченность $\chi_r \cdot M_{H_r}$.

Расчеты были проведены с использованием магнитных характеристик образцов стали 45 (закалка при 860 °С; отпуск при температурах от 20 °С до 650 °С) из работы [5]. Строились две модели: для твердости и температуры отпуска. Для твердости модель имеет вид

$$\begin{aligned} HRC_B = & 2,303 - 1,633 \cdot H_c + 0,126 \cdot M_{H_r} - \\ & - 0,6002 \cdot \chi_r + \\ & + 0,03216 \cdot H_c^2 - 3,525 \cdot 10^{-5} \cdot M_{H_r}^2 + \\ & + 1,0526 \cdot 10^{-4} \cdot \chi_r \cdot M_{H_r} \end{aligned} \quad (3)$$

Из (3), согласно (2), следует уравнение для мультипликативной ошибки δ_y , например, при температуре отпуска $T_{o.n.} = 300$ °С для зависимой переменной линейной модели [1; 2]

$$\begin{aligned} \delta_y = & -0,486 \cdot \delta_{H_c} + 5,461 \cdot \delta_{M_{H_r}} - 1,787 \cdot \delta_{\chi_r} + \\ & + 0,128 \cdot \delta_{H_c^2} - 2,978 \cdot \delta_{M_{H_r}^2} + 0,611 \cdot \delta_{\chi_r \cdot M_{H_r}} \end{aligned} \quad (4)$$

Наибольший вклад в ошибку вычислений зависимой переменной вносит релаксационная намагниченность M_{Hr} и квадрат ее величины. Причем коэффициент значимости погрешности для M_{Hr} превышает 5.

Однако, если отдельно учитывать погрешности измеряемых величин (δ_{Hc} , $\delta_{M_{Hr}}$ и δ_{Hr}), то (4) упроститься

$$\delta_y = -0,23 \cdot \delta_{Hc} - 1,06 \cdot \delta_{M_{Hr}} + 1,17 \cdot \delta_{Hr} \quad (5)$$

Максимальная значимость погрешности в (5) в несколько раз меньше при сравнении с (4). При отсутствии корреляционной связи между слагаемыми уравнения (5) и полагая погрешности слагаемых равными 1 %, ошибка модели составляет 2,47 % (суммирование без учета знака коэффициентов). При наличии корреляции между слагаемыми – менее 0,12 %. Что существенно меньше, чем для (4), поскольку для данной модели возможна внутренняя компенсация погрешностей измеряемых величин, что является важной ее особенностью, если проводить сравнение с большинством используемых моделей.

Аналогичные (4) и (5) выражения, но для температуры отпуска

$$\delta_y = 17,0227 \cdot \delta_{Hc} - 34,3708 \cdot \delta_{M_{Hr}} + 7,2422 \cdot \delta_{Hr} - 7,9579 \cdot \delta_{Hc}^2 + 19,947 \cdot \delta_{M_{Hr}}^2 - 2,61407 \cdot \delta_{Hr \cdot M_{Hr}} \quad (6)$$

$$\text{и } \delta_y = -5,51 \cdot \delta_{Hc} + 56,17 \cdot \delta_{M_{Hr}} - 27,10 \cdot \delta_{Hr} \quad (7)$$

Коэффициенты значимости мультипликативных ошибок δ_j независимых переменных для выражений (4) и (5) существенно ниже, чем для (6) и (7).

На рисунке 1 приводятся значения мультипликативной погрешности δ_{yJ} , рассчитанные по выражению (6) для $J = 1-50$ совокупностей изменяющихся случайным образом от нуля до 1 % для δ_{Hc} , $\delta_{M_{Hr}}$ и δ_{Hr} и от нуля до 2 % для δ_{Hc}^2 , $\delta_{M_{Hr}}^2$ и $\delta_{Hr \cdot M_{Hr}}$.

То есть максимальное значение погрешности δ_y по формуле (6) оказалось равным приблизительно 120 %. Из рисунка 1 понятно, что величина δ_y не превышает 80 % для большинства J случайных наборов величин δ_j , то есть в 1,5 раза меньше своего максимального расчетного значения.

Это позволяет утверждать, что вероятность достижения как максимального значения δ_y , так и превышения некоторого порогового значения маловероятно. Сравнение двух моделей показало большую надежность первой из них (для твердости).

Следует рекомендовать проводить предварительный анализ каждой полученной регрессионной многопараметровой модели, что должно обеспечить определение вклада в погрешность входящих в модель независимых переменных и более объективно предсказать максимальную величину ошибки восстановления данных по ней.

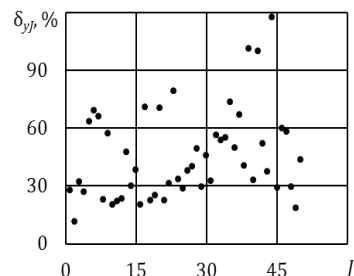


Рисунок 1 – Изменение погрешности модели δ_{yJ} при J -ом случайном наборе мультипликативных ошибок δ_{jJ} независимых переменных x_j

Для адекватной оценки надежности оборудования и величины ошибки восстановления данных по регрессионной многопараметровой модели следует проводить анализ, учитывая погрешности определения непосредственно значимых величин, влияющих на качество производимой продукции и используемых в данной модели.

Использование регрессионных многопараметровых моделей для задач неразрушающего контроля является перспективным направлением повышения точности и надежности, а также увеличения возможностей контроля и расширения области использования оборудования.

Литература

- Осипов, А.А. Оценка точности многопараметровых регрессионных моделей в задачах неразрушающего контроля / А.А. Осипов // Дефектоскопия. – 1995. – № 1. – С. 78–84.
- Осипов, А.А. Применение множественного регрессионного анализа в некоторых задачах неразрушающего контроля / А.А. Осипов // Дефектоскопия. – 1995. – № 4. – С. 87–93.
- Оценка регрессионных многопараметровых моделей в задачах магнитного неразрушающего контроля / А.А. Осипов [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2018. – № 4. – С. 32–44.
- Бида, Г.В. Комплексное использование магнитных свойств сталей при неразрушающем контроле качества термообработанных деталей / Г.В. Бида, А.Н. Сташков // Дефектоскопия. – 2003. – № 4. – С. 67–74.
- Бида, Г.В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г.В. Бида, А.П. Ничипурук. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 219 с.

УДК 621.396.6

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОКОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ 3D ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ

Ланин В.Л., Хацкевич А.Д.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрен процесс формирования микроконтактных соединений в виде бампов припоя для монтажа 3D электронных модулей по технологии *FLIP-CHIP* с применением индукционного нагрева. Для оптимизации режимов процессов формирования массива шариков припоя выполнено моделирование параметров локальной индукционной пайки в программном пакете *COMSOL Multiphysics*. Для локализации индукционного нагрева применены ферритовые кольца и медный концентратор вихревых токов. Высокочастотный инвертор выполнен по энергоэффективной схеме *ZVS* генератора. Установлено, что концентраторы вихревых токов и ферритовые кольца повышают скорость и равномерность нагрева, которая составила 5–7 °С при мощности 130–200 Вт.

Ключевые слова: контактные соединения, бампы припоя, индукционный нагрев, пайка.

FORMATION OF MICROCONTACT JOINTS IN HIGH-SPEED 3D ELECTRONIC DEVICES

Lanin V.L., Khatskevich A.D.

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

Abstract. The process of forming microcontact connections in the form of solder bumps for mounting 3D electronic modules using *FLIP-CHIP* technology using induction heating is considered. To optimize the process conditions for forming an array of solder balls, the parameters of local induction soldering were simulated in the *COMSOL Multiphysics* software package. Ferrite rings and a copper eddy current concentrator were used to localize induction heating. The high-frequency inverter is made using an energy-efficient *ZVS* generator circuit. It has been established that eddy current concentrators and ferrite rings increase the speed and uniformity of heating, which amounted to 5–7 °C at a power of 130–200 W.

Key words: contact connections, solder bumps, induction heating, soldering.

e-mail: vlanin@bsuir.by

Введение

При сборке многокристалльных и многослойных 3D конструкций изделий современной электроники для организации межслойных связей широко используются объемные выводы на основе припойных шариков малого диаметра (<1000 мкм), установленных на контактах подложек для последующего *Flip-Chip* монтажа. Для формирования шариковых выводов для технологии *Flip-Chip* необходимо не только правильно выбрать материалы, но и способы нагрева, обеспечивающие высокую локализацию мощности в зоне нагрева и малые зоны термического влияния.

Бампы припоя на плате можно формировать индукционным нагревом, который создает вихревые токи и пондеромоторные силы в расплаве припоя, которые перемешивают многофазные структуры в жидких средах. Преимуществами индукционного нагрева является локальность и высокая скорость нагрева, энергоэффективность [1].

Практическая часть

Шарики припоя диаметром 760 мкм формировались на контактных площадках подложки с помощью локального индукционного нагрева (рисунок 1). Паяльная паста Mechanic XGSP-80 наносилась трафаретной печатью на контактные площадки подложки. Для контроля качества соединений микровыводов припоя использовался

разрушающий метод определения усилия на сдвиг. Измерение усилия на сдвиг проводили плавным увеличением однонаправленного усилия, приложенного к шариковому выводу до его сдвига с контактной площадки, на которой он был запаян.

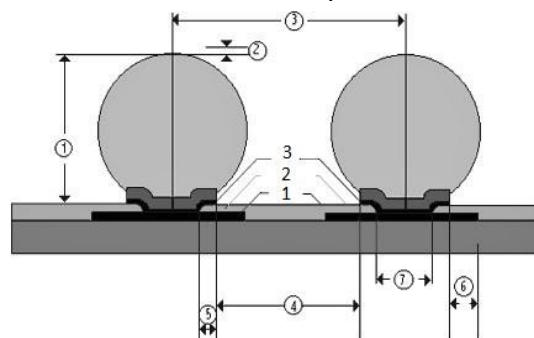


Рисунок 1 – Схема формирования микровыводов припоя для 3D сборки электронных модулей:

1 – контактная подложка; 2 – пассивный слой;
3 – покрытие под шариковым выводом

Частота генератора была выбрана 630 кГц. Для локализации магнитного поля в схеме использованы ферритовые кольца марки 2000НМ. Под платой располагался концентратор вихревых токов, выполненный из меди, что позволило добиться локализации электромагнитной энергии в зоне пайки. Контроль температуры проводился

при помощи измерителя ТРМ-210 и термопары, данные с которого передавались на компьютер по шине RS-485 для последующей обработки данных.

Массив шариков бессвинцового припоя Sn-3,5Ag-0,5Cu диаметром 0,76 мм размещен на печатной плате из стеклотекстолита FR-4 (рисунок 2). Медный концентратор применен для повышения эффективности и равномерности нагрева.

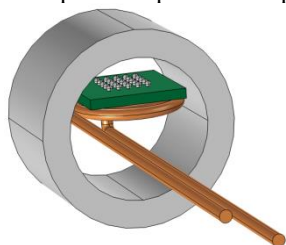


Рисунок 2 – Индуктор и печатная плата с массивом шариков припоя в кольцевом ферритовом сердечнике

Мощность нагрева составляла 200–250 Вт. Сформированные шарики припоя соответствовали размерам контактных площадок, имели правильную форму и блестящую поверхность, что свидетельствует об отсутствии перегрева. Для контроля прочности на сдвиг бампов использовалась установка ЭМ-6705 ОАО «Планар-СО» (рисунок 3).

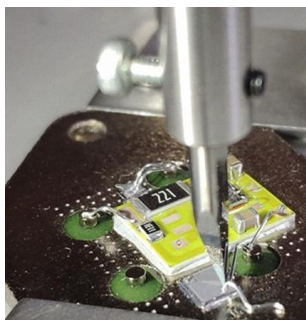


Рисунок 3 – Тест прочности вывода на сдвиг

Перемещение тестируемых плат и приложение рабочих нагрузок выполнялось трехкоординатным приводом на шаговых двигателях. Это позволило обеспечить точность позиционирования испытываемого объекта, возможность дозирования нагрузки и повторяемость однотипных тестов.

Для оптимизация режимов процессов формирования массива шариков припоя индукционным нагревом проведено моделирование параметров локальной индукционной пайки в программном пакете *COMSOL Multiphysics* [2].

В результате моделирования получено тепловое поле платы электронного модуля (рисунок 4). Мощность индукционного нагрева на частоте 900 кГц составила 130 Вт, средняя температура шариков припоя 212 °С, а температура медного концентратора 276 °С. Термопрофили индукционной пайки платы с бессвинцовыми шариками припоя и медным концентратором в ферритовом сердечнике

представлены на рисунок 5, из которого видно, что уменьшение частоты ведет к увеличению скорости нагрева и температуры шариков припоя.

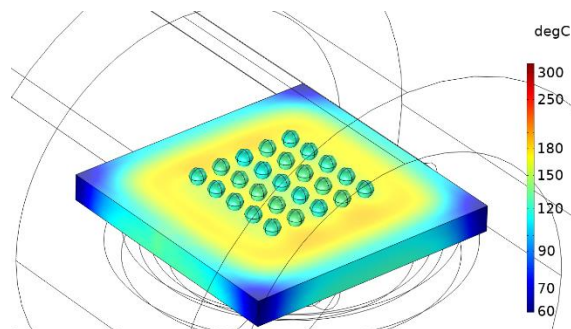


Рисунок 4 – Температурное поле платы с шариками припоя

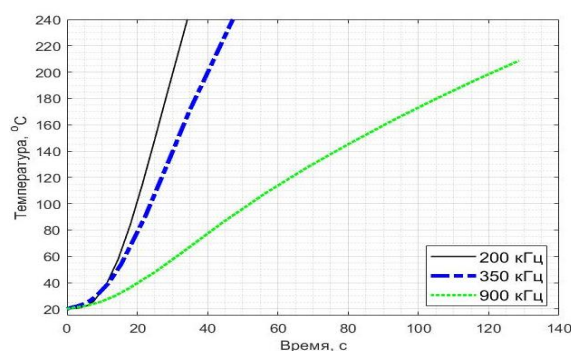


Рисунок 5 – Термопрофили с концентратором и ферритовым кольцом на различных частотах

Применение частот ниже 200 кГц нецелесообразно, так как это приводит к перегреву медного концентратора, что в свою очередь приводит к перегреву печатной платы. Поэтому рабочий диапазон частот необходимо выбирать в диапазоне 400 кГц – 1 МГц для данной конфигурации паяемого образца и мощности индуктора.

Выводы

Таким образом, использование медных концентраторов вихревых токов и ферритовых колец позволяет повысить эффективность индукционного нагрева за счет концентрации электромагнитного поля в зазоре между индуктором и замкнутым магнитопроводом. Скорость нагрева составляет 5–7 °С/с при мощности индуктора 130–200 Вт.

Литература

1. Ланин, В.Л. Высокочастотный электромагнитный нагрев для пайки электронных устройств / В.Л. Ланин // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 5. – С. 162–167.
2. Khatskevich, A. Modeling local induction heating of solder balls for FLIP-CHIP mounting in COMSOL MULTIPHYSICS / A. Khatskevich, V.L. Lanin // Proceeding of VI International Science and Practical Conf. Science and Technology 2023. – Almaty. – 2023. – P. 364–368.

УДК 721.8

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МАКУМЭ-ГАНЕ ДЛЯ МЕДНЫХ СПЛАВОВ

Попов Р.А., Луговой В.П.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Техника макумэ-ганэ представляет собой способ составления материала из разнородных и разноокрашенных металлов со сходными или практически сходными физическими свойствами, образующий узор подобный на срез фактурного дерева. Цветной узор образуется за счет чередования разных по цвету металлов и сплавов в поковке, которые предварительно шлифуют, притирают между собой, собирают и зажимают в пакет на специальном зажиме. Целью настоящих исследований было разработать технологию макумэ-гане для образца, состоящего из слоев двух недргоценных металлов: **меди и латуни**, т. е. сплава меди с цинком.

Ключевые слова: макумэ-ганэ, металлы, узор.

APPLICATION OF MAKUME-GANE TECHNOLOGY FOR COPPER ALLOYS

Popov R.A., Lugovoy V.P.

Belarusian state university of informatics and radioelectronics

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The makume-gane technique is a method of composing a material from dissimilar and differently colored metals with similar or almost similar physical properties, forming a pattern similar to a cut of textured wood. The colored pattern is formed by alternating metals and alloys of different colors in a forging, which are pre-ground, ground together, assembled and clamped into a bag on a special clamp. The purpose of this research was to develop makume-gane technology for a sample consisting of layers of two base metals: copper and brass, i. e. alloy of copper and zinc.

Key words: the makume-gane, metals, pattern.

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

Макумэ-ганэ (с японского – текстурированный металл) – материал, составленный из разнородных и разноокрашенных металлов со сходными или практически сходными физическими свойствами, образующий узор подобный на срез фактурного дерева. Исторически техника макумэ-ганэ использовалась в средневековой Японии для украшения оружия или предметов обихода высшего сословия. В настоящее время применяются в ювелирном деле в украшениях. В Европе и Центральной Азии существовала сходная техника – демаскированной стали или узорчатого дамаска, предусматривающая получение узора при помощи чередования и смешивания между собой путем проковки пластин или кусков стали с разным содержанием углерода.

Цветной узор образуется за счет чередования разных по цвету металлов и сплавов в поковке, которые предварительно шлифуют, притирают между собой, собирают и зажимают в пакет на специальном зажиме. Очередь в чередовании пластинок зависит от желаемого узора и его цвета. Собирать пакет можно как из только драгоценных и недргоценных металлов и сплавов, так и смешивая их, хорошей спаиваемостью между собой обладают медь и ее сплавы: латунь, мельхиор, нейзильбер, низкопробное золото и серебро; серебро и его сплавы: электрум, техническое и ювелирное серебро; золото и его сплавы.

Затем пакет устанавливают в печь при температуре 600–1000 °С в зависимости от используемых сплавов на время необходимое для диффузионной сварки пластинок (обычно 4–8 часов). Во время этого процесса металлы пластинок диффундируют между собой на молекулярном уровне, но недостаточно для сильных связей между пластинками. После очистки от остатков заготовку проковывают при температурах выше 700 °С, чтобы слои окончательно «срослись» между собой. Далее на поверхности поковки высверливают отверстия глубиной в половину толщины поковки или вырезают канавки для получения интересного узора, проковывают или прокатывают пластину на вальцах для уменьшения толщины.

В результате получают пластину с точечным или смешанно-концентрическим узором, напоминающим множество кругов на воде или пятна гепарда. Окончательно изделие зачищают и полируют, а при слабовыраженном узоре травят в кислоте или в растворе для чернения.

Целью настоящих исследований было разработать технологию макумэ-гане для образца, состоящего из слоев двух недргоценных металлов: **меди и латуни**, т. е. сплава меди с цинком. Пакет для диффузионной сварки толщиной 8 мм и размером 20×40 мм был образован из пластин толщиной 2 в несколько слоев. При использовании

медных сплавов из латуни и нейзильбера температурную обработку осуществлять в диапазон 650–750 °С во избежание выгорания и испарения цинка. В соответствии с этими рекомендациями исследуемый образец был подвержен термической обработке в печи при температуре 740 °С в течение 4 час, а затем проковке, а затем прокатке до получения образца толщиной 1,2 мм размером 40×80. В спаянном пакете были хаотично высверлены глухие отверстия диаметром 1,2 и 4,0 мм.

Для выявления красочных узоров пластина была предварительно протравлена в 20 % растворе серной кислоты для удаления верхней оксидной пленки с поверхности пластины. Пластинку зачистили и отполировали, обезжирили и обрабатывали в растворе КААС 232, предназначенного для чернения, который содержит смесь серной кислоты, серной печени (K_2SO_4), комплекса солей железа и едкого натрия. Обработка раствором КААС выполнялась медленным нанесением раствора на образец, погруженный в воду для исключения возможности образования оксидной пленки. Затем следовала помывка и сушка пластины. Окончательно для усиления контраста полученных узоров на поверхности медного сплава образец подвергался обработке раствором хромпика $K_2Cr_2O_7$, после чего следовала тщательная промывка в воде.

Полученный результат художественной обработки медного сплава методов макумэ-гане представлен на рисунке 1. Центральная зона округлой формы представляет собой зону, которая подвергалась химическому воздействию струей красящего раствора КААС.

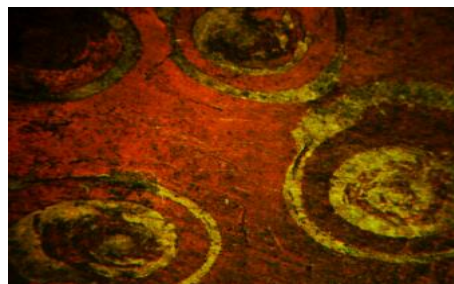
Фрагменты узоров на поверхности образца приведены на рисунке 2.

На представленных фотографиях (рисунок 2) видно, что окончательная химическая обработка пластины слабым раствором серной кислоты

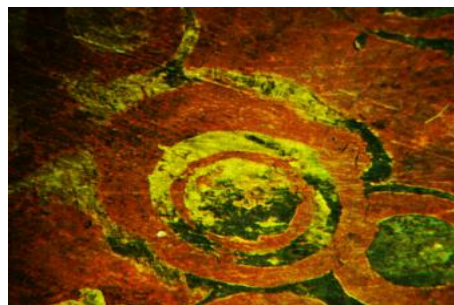
позволяет получить более контрастные и выразительные рисунки на поверхности.



Рисунок 1 – Фотография художественно обработанного образца, полученного методов макумэ-гане



a



б

Рисунок 2 – Фотографии фрагментов узоров на образцах из медных сплавов (x24): *a* – необработанная поверхность с оксидной пленкой, *б* – потравленная поверхность

УДК 666.652.4

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КУПРАТОВ МЕТАЛЛОВ (II, IV)

Гундилович Н.Н.¹, Дятлова Е.М.¹, Бука А.В.¹, Попов Р.Ю.¹, Колонтаева Т.В.²

¹Белорусский государственный технологический университет

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе выполнен синтез керамических материалов на основе купратов кальция, магния, бария, марганца (IV) и титана. Изучены физико-химические (водопоглощение, открытая пористость, кажущаяся плотность) и электрофизические (удельное объемное электрическое сопротивление, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь) свойства керамических материалов, исследованы процессы структуро- и фазообразования при их получении. Практическая значимость результатов НИР заключается в разработке составов сырьевых композиций и технологических параметров получения новых функциональных материалов на основе купратов металлов (II, IV), которые могут быть использованы для различных компонентов электронной техники.

Ключевые слова: купрат металла, твердофазный синтез, диэлектрическая проницаемость, структура.

SYNTHESIS AND STUDY OF CERAMIC MATERIALS BASED ON METAL CUPRATES (II, IV)

Gundilovich N.N.¹, Dyatlova E.M.¹, Buka A.V.¹, Popov R.Yu¹, Kolontaeva T.V.²

¹Belarusian state technological university

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The synthesis of ceramic materials based on cuprates of calcium, magnesium, barium, manganese (IV) and titanium was carried out on this work. The physicochemical (water absorption, open porosity, apparent density) and electrophysical (volumetric electrical resistivity, dielectric constant, dielectric loss tangent) properties of the ceramic materials have been studied, and the processes of structure and phase formation during their production have been studied. The practical significance of the research results consists in the development of compositions of raw materials and technological parameters for the production of new functional materials based on metal cuprates (II, IV), which can be used for various components of electronic equipment.

Key words: metal cuprate, solid-phase synthesis, dielectric constant, structure.

Адрес для переписки: Гундилович Н.Н., ул. Сведлова, 13а, г. Минск, 220006, Беларусь, e-mail: kolgund@mail.ru

Введение. Керамические материалы на основе купратов металлов и их твердых растворов находят широкое применение для систем передачи энергии, катодов твердооксидных топливных элементов, химических сенсоров газов и катализаторов. Особое внимание исследователей к купратам металлов обусловлено их способностью проявлять высокотемпературную сверхпроводимость, что позволяет использовать материалы на их основе для создания сверхпроводящих магнитов, соленоидов магнитных ускорителей, сверхпроводящих силовых кабелей, сканеров в медицине, электромагнитных устройств нагрева в металлообработке [1–3].

Физико-химические и, в частности, электрофизические свойства керамических материалов на основе купратов металлов являются структурно-чувствительными, поскольку в значительной степени зависят от особенностей строения кристаллической решетки. В связи с этим большое количество работ посвящено изучению взаимосвязи свойств керамических материалов на основе купратов металлов с их фазовым составом и структурой [2; 3].

В данной работе получены керамические материалы на основе купратов кальция, магния, бария, марганца (IV) и титана, изучены их физико-химические и электрофизические свойства, фазовый состав и структура.

Материалы и методы исследования.

В качестве сырьевых материалов использованы оксиды: CuO, CaO, MgO, MnO₂, BaO и TiO₂ квалификации «ч.д.а.».

Получение керамических материалов осуществлялось методом твердофазного спекания по двухстадийной технологии, включающей смешивание исходных компонентов и последующий сухой помол смесей в планетарной мельнице. Измельченные смеси загружались в тигли и обжигались в электрической лабораторной печи при температуре 950 °С, образующиеся спеки подвергались тонкому помолу в планетарной мельнице. Измельченные материалы смешивались со связующим, в качестве которого использовался этанол для получения пресс-порошка. Прессование опытных образцов осуществлялось при давлении 30 МПа. Обжиг образцов выполнялся в электрической печи при температуре 950–1050 °С со

скоростью подъема температуры 10 °С/мин с выдержкой при максимальной температуре в течение 1–2 ч.

В работе изучены физико-химические (водопоглощение, открытая пористость, кажущаяся плотность) и электрофизические (удельное объемное электрическое сопротивление, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь) полученных керамических материалов. Термические процессы, происходящие при синтезе материалов, исследованы при помощи дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Методом сканирующей электронной микроскопии изучена структура опытных образцов, рентгенофазовым анализом – их фазовый состав.

Результаты и их обсуждение. Результаты ДСК опытных смесей для получения различных купратов металлов (II, IV) позволили установить процессы, происходящие при синтезе исследуемых керамических материалов, и выбрать оптимальные температурно-временные параметры обжига.

Установлено, что при термообработке сырьевой смеси для получения купрата марганца (IV), наблюдаются 4 выраженных эндотермических эффекта. Тепловой эффект при температуре 318,3 °С связан с восстановлением примесного оксида марганца (II) до оксида марганца (IV). При повышении температуры до 543,1 °С происходит переход оксида марганца (IV) в оксид марганца (III). При температуре 820,7 °С Mn_2O_3 переходит в α - Mn_3O_4 . Эндотермический эффект при 938,6 °С связан с плавлением и спеканием материала.

Полученные керамические материалы характеризовались следующими физико-химическими свойствами: общая усадка составила 7,9–8,3 %, водопоглощение – 950–1050 °С – 8,43–16,89 %; кажущаяся плотность 3040–3340 кг/м³; открытая пористость – 17,04–36,52 %.

Определены электрофизические свойства опытных образцов: удельное объемное электрическое сопротивление в интервале температур 20–350 °С составило $(0,001–0,2) \cdot 10^6$ Ом·м, диэлектрической проницаемостью – 10–500, тангенсом угла диэлектрических потерь – $(70–489) \cdot 10^{-4}$.

На основе результатов рентгенофазового анализа полученных керамических образцов установлено, что в качестве преобладающих кристаллических фаз в полученных керамических материалах являются Ca_2CuO_3 , Mg_2CuO_3 , $Mn_3Cu_2O_8$, $BaCuO_2$, $CaCu_3Ti_4O_{12}$ в соответствующих системах. Определяющее значение на фазовый состав оказывает режим обжига, что подтверждается увеличением интенсивности дифракционных максимумов с повышением температуры и продолжительности обжига образцов.

Методом сканирующей электронной микроскопии установлено, что полученные керамические образцы характеризуются однородной структурой, наблюдается наличие пор со средним

эквивалентным диаметром 2–5 мкм, присутствуют кристаллические образования неправильной формы размером 0,5–2 мкм (рисунок 1).

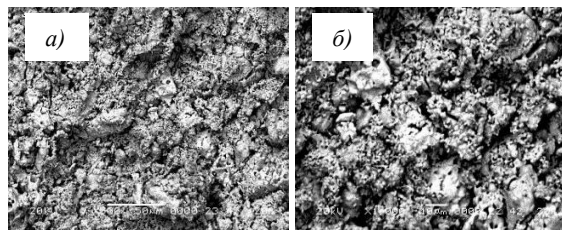


Рисунок 1 – Электронно-микроскопические снимки образца на основе купрата марганца при увеличениях $\times 500$ (а), $\times 1000$ (б)

Установлены зависимости электрофизических свойств (удельного электрического сопротивления, диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь) полученных керамических образцов на основе купратов кальция, магния, бария, марганца (II) и титана от природы и состава материалов, а также от температуры измерения (рисунок 2).

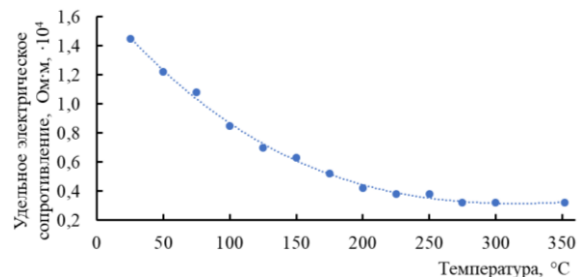


Рисунок 2 – Зависимость удельного электрического сопротивления образца на основе купрата марганца (IV) от температуры

Практическая значимость результатов работы заключается в разработке составов сырьевых композиций и технологических параметров получения новых функциональных материалов на основе купратов кальция, магния, бария, марганца (IV) и титана, которые могут быть использованы для различных компонентов электронной техники.

Литература

1. Теплоемкость, термическое расширение и электропроводность твердых растворов купратов $Nd_{1-x}Tm_xBa_2Cu_3O_{7-8}$ / А.И. Клындюк [и др.] // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. – 2006. – № 4. – С. 5–9.
2. Баранов, М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 10: открытие и изучение сверхпроводимости материалов / М.И. Баранов // Электротехника и электромеханика. – 2012. – № 5. – С. 3–12.
3. Маркова, Н.В. Термодинамика реакций образования и равновесий точечных дефектов в купрате бария-иттрия / Н.В. Маркова, В.В. Приседский // Химическая термодинамика. Фазовые равновесия и термодинамические характеристики компонентов: Сборник докладов Международной научной конференции к 100-летию проф. Кравченко В.М., Донецк, 10–11 июня 2010 г. – Донецк : Донецкий национальный технический университет, 2010. – С. 52–54.

УДК 618

МЕХАНИЗМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИОНОВ Sm^{3+} В ИТТРИЙ-АЛЮМОБОРАТНЫХ СТЕКЛАХ С СОСТАВОМ ВБЛИЗИ СТЕХИОМЕТРИИ ХАНТИТА

Прусова И.В.¹, Прихач Н.К.¹, Суходола А.А.¹, Мамаджанова Е.Х.²

¹Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь,

²Российский химико-технологический институт им. Д.И. Менделеева,

Москва, Российская Федерация

Аннотация. На основе анализа кинетики затухания люминесценции ионов самария в стеклах системы $\text{Sm}_x\text{Y}_{1-x}\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$ установлено, что донорно-акцепторные взаимодействия этих ионов осуществляются по диполь-квадрупольному механизму.

Ключевые слова: люминесценция; редкоземельные активаторы; механизмы донор-акцепторного взаимодействия.

MECHANISM OF Sm^{3+} IONS INTERACTION IN YTTRIUM-ALUMINOBORATE GLASSES WITH COMPOSITION CLOSE TO THE STOICHIOMETRY OF HUNTITE

Prusova I.¹, Prikhach N.¹, Sukhodola A.¹, Mamadzhanova E.²

¹Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

D.I. Mendeleev University of Chemical Technology

Moscow, Russian Federation

Abstract. It is shown on the basis of analysis of luminescence decay kinetics of samarium ions in glasses of the $\text{Sm}_x\text{Y}_{1-x}\text{Al}_2(\text{BO}_3)_4$ system that donor-acceptor interactions of these ions are realized by dipole-quadrupole mechanism.

Key words: luminescence; rare-earth activators; donor-acceptor interaction mechanisms.

Адрес для переписки: Прусова И.В., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by

Ионы Sm^{3+} обладают существенным спектроскопическим потенциалом, поскольку они характеризуются люминесценцией в видимой и ближней инфракрасной областях спектра и отсутствием наведенного поглощения из метастабильного состояния [1]. Это позволяет рассматривать активированные ими стекла и кристаллы в качестве возможного активного лазерного материала и люминофоров, в том числе для светоизлучающих диодов. Целью настоящей работы является определение механизма взаимодействия таких ионов в стеклах системы $\text{Sm}_x\text{Y}_{1-x}\text{Al}_2(\text{BO}_3)_4$.

В качестве исходных компонентов для получения стекол использовали Sm_2O_3 и Y_2O_3 квалификации «осч», $\text{Al}(\text{OH})_3$ (чда) и H_3BO_3 (хч). Плавку приготовленной шихты осуществляли в платиновых тиглях в электрических лабораторных печах сопротивления с SiC нагревателями на воздухе в течение часа при температуре ≈ 1550 °С. Расплав выливали на металлическую плиту и прессовали другой до толщины ~ 2 –3 мм.

Кинетика затухания люминесценции исследовалась с помощью импульсного лазера на эталонном растворе родамина 6Ж ($\lambda \approx 562$ нм, длительность импульса 10 нс), фотоумножителя и цифрового осциллографа с конечным временным разрешением < 1 мкс.

Как известно [2], дезактивацию метастабильного состояния активаторов в упрощенном случае можно описать с помощью выражения:

$$N(t) = N(0)\exp(-t/\tau_0 - \gamma t^{3/S} - Wt), \quad (1)$$

где $N(0)$ и $N(t)$ – заселенность метастабильного состояния в начальный момент времени и последующие; τ_0 – радиационное время жизни; γ – макропараметр ферстеровского распада; S – параметр мультипольности, равный соответственно 6, 8, 10 для диполь-дипольных, диполь-квадрупольных и квадруполь-квадрупольных донор-акцепторных взаимодействий, W – вероятность миграционно-обусловленной релаксации возбуждений. Определение механизма взаимодействия в таком случае сводится к поиску значения S , приводящего к линеаризации зависимости кроссрелаксационных потерь $\ln(I_0/I) - t/\tau_0$ от $t^{3/S}$.

На рисунке 1 представлена кинетика затухания люминесценции ионов Sm^{3+} в исследованных стеклах при $\lambda_{\text{рег}} = 598$ нм и $\lambda_{\text{возб}} = 562$ нм ($\lambda_{\text{возб}} = 404$ нм для образцов с минимальным значением N_{Sm}). Объемная концентрация этих ионов N_{Sm} составляла (10^{20} см⁻³): 0,18 (образец 1); 1,0 (2); 3,3 (3); 6,8 (4). Здесь и ниже номера кинетических кривых соответствуют номерам указанных образцов.

Видно, что для стекла с $N_{\text{Sm}} = 1,8 \cdot 10^{19}$ см⁻³ затухание люминесценции в первые 10 мс подчиняется экспоненциальному закону с постоянной $\tau_e = 2650 \pm 40$ мкс. За пределами этого участка скорость затухания постепенно уменьшается и на дальнем участке в диапазоне 19–26 мс удовлетворительно описывается экспонентой с постоянной

$\tau_{\text{far}} = 3360 \pm 70$ мкс. По мере увеличения концентрации Sm в стекле с $1,0 \cdot 10^{20}$ (кривая 2) до $6,8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ (кривая 4) закон затухания на изображенном участке все в большей степени отклоняется от экспоненциальной зависимости, и средняя длительность затухания снижается с 1620 до 220 мкс. Тем не менее, при времени затухания более 20 мс дальний участок кривой затухания люминесценции остается практически экспоненциальным с τ_{far} составляющим 3240 ± 90 и 3160 ± 100 мкс (для стекол, описываемых кривыми 2 и 3 соответственно). Это позволяет приравнять $\tau_0 = \tau_e$, пренебrecь W в выражении (1).

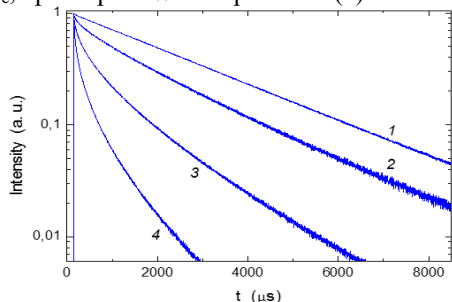


Рисунок 1 – Кинетика затухания люминесценции ионов Sm^{3+} в исследованных стеклах с различной N_{Sm}

На рисунках 2–4 изображены зависимости кроссрелаксационных потерь от $t^{3/S}$ для различных N_{Sm} , определенные на основе рисунка 1. Как видно, линеаризация полученных зависимостей осуществляется при параметре мультипольности $S = 8$.

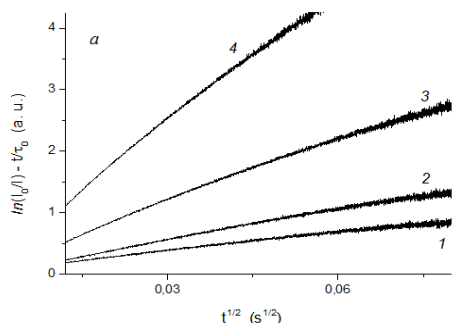


Рисунок 2 – Зависимость кроссрелаксационных потерь в исследованных стеклах от $t^{1/2}$

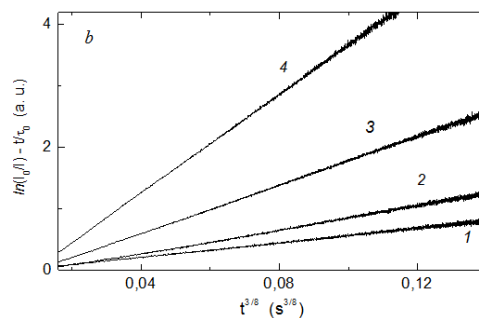


Рисунок 3 – Зависимость кроссрелаксационных потерь в исследованных стеклах от $t^{3/8}$

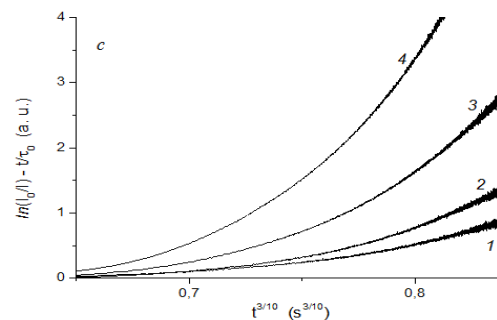


Рисунок 4 – Зависимость кроссрелаксационных потерь в исследованных стеклах от $t^{3/10}$

Таким образом, донор-акцепторное взаимодействие ионов Sm^{3+} в исследованных иттрий-алюмоборатных стеклах осуществляется по диполь-квадрупольному механизму.

Авторы выражают признательность гл. н. сотр. Института физики НАН Беларуси Г.Е. Малашкевичу за полезные консультации.

Литература

1. Спектрально-люминесцентные свойства Sm- и Ce-Sm-содержащих кварцевых гель-стекол / Г.Е. Малашкевич [и др.] // ФТГ. – 1998. – Т. 40, № 3. – С. 458–465.
2. Исследование природы безызлучательной релаксации энергии возбуждения в конденсированных средах с высоким содержанием активатора / Ю.К. Воронько [и др.] // ЖЭТФ. – 1976. – Т. 71, вып. 2(8). – С. 478–496.

УДК 621.791

ПРОБЛЕМА ИЗМЕРЕНИЯ КАЧЕСТВА И КОНЦЕПЦИЯ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
Романчак В.М., Вязгина А.Ю.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В настоящем исследовании рассматриваются аспекты, связанные с измерением качества. Из анализа существующей литературы можно сделать вывод, что при оценке качества товаров, работ и услуг применяются исключительно эвристические методы. Одновременно в современной теории измерений используется нестрогий гомоморфизм между эмпирическими и числовыми системами, что приводит к отсутствию строгого определения шкалы измерений. Для обоснованной оценки качества предлагается перейти от эвристических моделей, основанных на концепции абсолютных измерений, к концепции относительных измерений. Такой подход предположительно позволит эффективно решить проблему измерения в квалиметрии.

Ключевые слова: измерение качества, теория измерений, концепция относительных измерений.

THE PROBLEM OF QUALITY MEASUREMENT AND THE CONCEPT OF RELATIVE MEASUREMENTS

Romanchak V.M., Viazgina A.Y.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The present study examines aspects, related to quality measurement. From the analysis of the existing literature, it can be concluded that when assessing the quality of goods, works and services, heuristic methods are used exclusively heuristic methods. At the same time, modern measurement theory uses a non-strict homomorphism between empirical and numerical systems, which leads to the lack of a strict definition of measurement scales. For It is proposed to move from heuristic models, based on the concept of absolute measurements to the concept of relative measurements. This approach is expected to effectively address the problem of quality measurement.

Key words: quality, quality assessment, measurement theory, concept of relative measurements.

*Адрес для переписки: Романчак В.М., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: Romanchak@bntu.by*

Качество является ключевым показателем продукта или услуги, но его измерение представляет сложную задачу, зависящую от различных факторов. Квалиметрия, наука, предлагает комплексные эвристические методы для решения таких задач. В квалиметрии качество рассматривается как совокупность свойств, интересных для потребителя. Эти свойства упорядочиваются с учетом их иерархии и вводится система оценки каждого качества. Затем, с использованием математической модели и учетом значений и весов оценок, можно получить показатель качества продукции.

Существуют различные методы квалиметрии, такие как точный, приближенный и упрощенный. Точный метод обеспечивает наименьшую погрешность и наиболее надежные результаты, но требует больших трудозатрат и используется в особых случаях, где точность прогнозирования является важной. Методы также делятся на экспертные, не экспертные и смешанные, в зависимости от использования экспертных знаний для оценки качества продукта [1].

Квалиметрия широко применяется в оценке различных явлений. Например, с использованием методов квалиметрии проведено исследование

предпочтений потребителей мучных кондитерских изделий, таких как печенье и крекеры [2]. В этом исследовании использовались анкеты для определения весовых коэффициентов и ранжирования предпочтений потребителей, а также для оценки образцов печенья и крекеров на рынке. Этот метод позволяет установить требования к качеству продукции на этапе проектирования и минимизировать корректировки после выхода продукции на рынок.

В другом примере [3], с использованием дифференциального метода, была проведена оценка фактических показателей спортивно-оздоровительных услуг по сравнению с базовыми показателями. С помощью шкалы отношений было установлено, что организациям необходимо улучшать услуги в области проживания, мест для курения, оснащения рабочих мест и ограждений возле электрощитов и т. д.

Также с помощью методов квалиметрии проведен анализ ошибочных действий скалолазов при прохождении соревновательной трассы [4]. Исследования позволили выявить основные ошибки, классифицировать их и определить признаки контролируемых и неконтролируемых ошибок. Анализ литературы показывает, что со-

временные способы оценки качества являются эвристическими моделями. Таким образом, при разработке математической модели в квалиметрии необходимо учитывать субъективность измерения качества. На этом основании делается вывод, что при формировании математической модели в квалиметрии необходимо учитывать тот факт, что качество – это субъективно измеряемая величина [5].

Проблема измерения играет важную роль в различных областях и включает в себя проблему экспертного оценивания. Аксиоматическое определение измерения, предложенное А. Тарским, устанавливает, что измерение является гомоморфным отображением эмпирической системы с отношениями на числовую систему с отношениями. Другими словами, измерение понимается как установление соответствия между эмпирической системой и числовой системой. Когда такое соответствие установлено, говорят, что имеется шкала измерений.

Сейчас в теории измерений преобладает концепция абсолютного измерения, теоретическим обоснованием которой является определение нестрогого гомоморфизма. Согласно этой концепции, при математическом моделировании реальных явлений или процессов необходимо определить типы шкал, с помощью которых измеряются переменные. Тип шкалы определяет набор допустимых преобразований этой шкалы. Нестрогий гомоморфизм – это понятие, связанное с алгеброй. Гомоморфизм – это отображение или функция между двумя алгебраическими структурами, которое сохраняет операции этих структур. Нестрогий гомоморфизм позволяет анализировать отображения между различными алгебраическими структурами и устанавливать связи между ними без необходимости точного совпадения элементов. Это концепция полезна в эвристических моделях, однако применение ее в теории измерений указывает на неполноту математической модели данной теории.

Строгий изоморфизм требует полного соответствия отношений (операций) в эмпирической и числовой системе. На практике сложно обеспечить такое полное соответствие в рамках существующей концепции абсолютного измерения. Из-за этого в репрезентативной теории измерений придерживаются взгляда, что условие строгого гомоморфизма является «слишком строгим». Чтобы обосновать операции в числовой системе,

вводят новые операции в эмпирическую систему путем расширения. Например, если сложение имеет смысл в числовой системе, то его можно определить и для эмпирической системы, выполнив гомоморфное отображение числовой системы в эмпирическую и добавив аналогичную сложению операцию. Таким образом, вместо задачи репрезентации эмпирической системы решается задача ее расширения с помощью нестрогого гомоморфизма.

Использование нестрогого гомоморфизма приводит к отсутствию конструктивного определения шкалы измерений в репрезентативной теории измерений, что приводит к серьезным проблемам при представлении результатов измерений. Поэтому предлагается перейти от эвристических моделей, основанных на абсолютном измерении, к моделям относительных измерений для более точной оценки качества [6]. Можно предположить, что результаты планируемого исследования помогут решить проблему измерения в квалиметрии.

Литература

1. Азгальдов, Г.Г. О квалиметрии / Г.Г. Азгальдов, Э.П. Райхман, А.В. Гличев. – М. : Стандартиздат, 1973.
2. Васенкова, Е.И. Использование методов квалиметрии в управлении качеством и конкурентоспособностью продукции / Е.И. Васенкова, Л.А. Мельникова // *Материалы XXII междунар. науч.- практ. конф., Минск, 17 мая 2013 г.* – Минск : Изд-во МИУ, 2013. – С. 61–62.
3. Колегова, К.С. Квалиметрическая оценка качества спортивно-оздоровительных услуг / К.С. Колегова, В.В. Левшина, Н.В. Фадеева / *Вестник Алтайской академии экономики и права.* – 2019. – № 5, ч. 3. – С. 64–69.
4. Котченко, Ю.В. Квалиметрический анализ ошибочных действий скалолаза при прохождении соревновательной трассы / Ю.В. Котченко // *Здоровье человека, теория и методика физической культуры и спорта.* – 2020. – № 4 (20). – С. 62–71.
5. Серенков, П.С. Качество как субъективно измеряемая величина / П.С. Серенков, В.М. Романчук // *Приборы и методы измерений.* – 2019. – Т. 10, №. 1. – С. 99–110.
6. Romanchak, V. The Problem of the Adequacy of the Analytic Hierarchy Process and Its Solution / V. Romanchak // *Analytic Hierarchy Process-Models, Methods, Concepts, and Applications.* – IntechOpen, 2023

UDC 517.956.35

MILD SOLUTION OF THE CAUCHY PROBLEM FOR A SEMILINEAR NONSTRICTLY HYPERBOLIC EQUATION ON A HALF-PLANE IN THE CASE OF A SINGLE CHARACTERISTIC

Korzyuk V.I.¹, Rudzko J.V.^{1,2}

¹Belarusian State University,

²Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. For a semilinear nonstrictly hyperbolic equation on a half-plane in the case of a single characteristic given in the upper half-plane, we consider the Cauchy problem, for which we study issues related to the mild solution.

Key words: Cauchy problem, nonstrictly hyperbolic equation, semilinear equation, mild solution.

СЛАБОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ ПОЛУЛИНЕЙНОГО НЕСТРОГО ГИПЕРБОЛИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ НА ПОЛУПЛОСКОСТИ В СЛУЧАЕ ОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Корзюк В.И.¹, Рудзько Я.В.^{1,2}

¹Белорусский государственный университет,

²Институт математики Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Для полулинейного нестрога гиперболического уравнения на полуплоскости в случае единственной характеристики, заданной в верхней полуплоскости, рассматривается задача Коши, для которой изучаются вопросы, связанные с слабым решением.

Ключевые слова: задача Коши, нестрога гиперболическое уравнение, полулинейное уравнение, слабое решение.

Correspondence address: Rudzko J.V., 11 Surganov Street, Minsk, Republic of Belarus, 220072
e-mail: janycz@yahoo.com

Statement of the problem. In the domain $Q = (0, \infty) \times \mathbb{R}$, consider the m^{th} -order nonlinear differential equation

$$(\partial_t - a\partial_x + b)^m u(t, x) = f(t, x, u(t, x)), \quad (1)$$

where a and b are given real numbers, satisfying the condition $a \neq 0$ (it means that the line $t = 0$ is not the characteristic of Eq. (1)), and f is a function given on the set $\bar{Q} \times \mathbb{R}$.

Equation (1) is equipped with the initial condition

$$\partial_t^i u(0, x) = \varphi_i(x), \quad i = 0, \dots, m - 1, \quad x \in \mathbb{R}, \quad (2)$$

where φ_i are functions given on the real axis.

Eq. (1) describes a wavefield resulting from the superposition of m waves traveling in one direction with equal velocity. When $m = 1$, Eq. (1) is called the one-dimensional transport equation. Equations of the kind (1) appear in many physical phenomena where discontinuous or singular entities are involved, for instance, in the wave propagation in a layered medium [1]. Eq. (1) is also used for the modeling k-out-of-n systems [2] and can have some applications in classical field theory.

The existence and uniqueness of classical solutions of the problem (1), (2) were studied in our preprint [3].

Reduction to the Cauchy problem for an ordinary differential equation. Making the linear nondegenerate change of independent variables

$\tau = t, \xi = x + at$, and denoting $u(t, x) = v(\tau, \xi)$, we obtain the new differential equation

$$(\partial_\tau + b)^m v(\tau, \xi) = F(\tau, \xi, v(\tau, \xi)), \quad (3)$$

where $F(\tau, \xi, v) = f(\tau, \xi - a\tau, v)$. The initial conditions for the function v can be computed using the Faà di Bruno's formula or the chain rule, and they have the form

$$v(0, \xi) = \tilde{\varphi}_0(\xi) = \varphi_0(\xi), \quad \partial_\tau^i v(0, \xi) = \tilde{\varphi}_i(\xi) = \sum_{j=0}^i \binom{i}{j} (-a)^{i-j} D^{i-j} \varphi_j(\xi), \quad i = 1, \dots, m - 1. \quad (4)$$

Now Eq. (3) with the conditions (4) can be considered as the Cauchy problem for an ordinary differential equation with the parameter ξ , i. e.,

$$(D + b)^m v_\xi(\tau) = F(\tau, \xi, v_\xi(\tau)), \quad (5)$$

$$D^i v_\xi(0) = \tilde{\varphi}_i(\xi), \quad i = 0, \dots, m - 1, \quad (6)$$

We can say that the problems (1), (2) and (5), (6) are the same in the sense that the first is written in Eulerian coordinates (t, x) and the second in Lagrangian coordinates (τ, ξ) .

To simplify Eq. (5), we use the following ansatz

$$v_\xi(\tau) = w_\xi(\tau) \exp(-b\tau). \quad (7)$$

Substituting (7) into (5), we obtain the equation

$$D^m w_\xi(\tau) = \Phi(\tau, \xi, w_\xi(\tau)), \quad (8)$$

where

$$\Phi(\tau, \xi, w) = F(\tau, \xi, w \exp(-b\tau)) \exp(b\tau).$$

The Cauchy conditions have the form

$$\begin{aligned} w_\xi(0) &= \psi_0(\xi) = \exp(b\tau) \tilde{\varphi}_0(\xi), \\ D^i w_\xi(0) &= \psi_i(\xi) = \\ &= \sum_{j=0}^i \binom{i}{j} b^j \tilde{\varphi}_{i-j}(\xi), \quad i = 1, \dots, m-1. \end{aligned} \quad (9)$$

Now we can use the theory of generalized solutions for ordinary differential equations to construct generalized solutions of the Cauchy problem (1), (2).

Note that the smoothness of the "new" initial conditions is not worse than the "old" ones in the sense that $\varphi_i \in C^{n-i}(\Omega)$ if and only if $\tilde{\varphi}_i \in C^{n-i}(\Omega)$ and $\tilde{\varphi}_i \in C^{n-i}(\Omega)$ if and only if $\psi_i \in C^{n-i}(\Omega)$, where $\Omega \subseteq \mathbb{R}$, $n \geq m-1$, and $i = 0, \dots, m-1$.

Mild solution. The classical and mild solutions of the problem (8), (9) can be represented as [4]

$$\begin{aligned} w_\xi(\tau) &= \sum_{i=0}^{m-1} \frac{\psi_i(\xi) \tau^i}{i!} + \frac{1}{(m-1)!} \times \\ &\times \int_0^\tau \Phi(\tau_1, \xi, w_\xi(\tau_1)) (\tau - \tau_1)^{m-1} d\tau_1. \end{aligned}$$

Returning to the original variables, we get

$$\begin{aligned} u(t, x) &= \sum_{i=0}^{m-1} \frac{\psi_i(x + at) \exp(-bt) t^i}{i!} + \\ &+ \frac{1}{(m-1)!} \int_0^t [\exp(-b(t-\tau)) (t-\tau)^{m-1} \times \\ &\times f(\tau, x + a(t-\tau), u(\tau, x + a(t-\tau)))] d\tau. \end{aligned} \quad (10)$$

We can use Eq. (10) to define a mild solution of the Cauchy problem (1), (2).

Definition 1. The function u is a mild solution of the Cauchy problem (1), (2) if it is a solution of Eq. (10).

Theorem 1. Let the conditions $f \in C(\bar{Q} \times R)$, and $\varphi_i \in C^{m-i-1}(\mathbb{R})$, $i = 0, \dots, m-1$, be satisfied, and let the function f satisfy the Lipschitz condition

$$|f(t, x, z_1) - f(t, x, z_2)| \leq K(t, x) |z_1 - z_2|,$$

where $K \in C(\bar{Q} \times \mathbb{R})$. The Cauchy problem (1), (2) has a unique mild solution in the class $C(\bar{Q})$.

The **proof** of the theorem is carried out using the Leray–Schauder fixed point theorem.

Note that, in contrast to strictly hyperbolic equations [5], here we have to increase the smoothness of the initial data by $m-1$ times to construct a weak solution because the functions ψ_i , $i = 0, \dots, m-1$, must be continuous and defined everywhere. It is because the characteristic has a multiplicity m . Any characteristic of multiplicity k entails increasing the smoothness of the initial data by $k-1$ times to construct a well-defined solution [6].

Remark 1. In Theorem 1, the smoothness conditions " $\varphi_i \in C^{m-i-1}(\mathbb{R})$, $i = 0, \dots, m-1$ " can be weakened to «the functions φ_i , $i = 0, \dots, m-1$, have all derivatives up to order $m-i-1$, which are defined everywhere on the set R and are piecewise continuous». But the solution will no longer be continuous on the set $[0, \infty) \times \mathbb{R}$. Instead, it will be discontinuous on some characteristics $x + at = \text{const}$.

Further weakening of the smoothness conditions for the initial data to piecewise smooth functions or to functions belonging to the Sobolev spaces can lead to difficulties in defining the functions ψ_i , $i = 0, \dots, m-1$, since a discontinuous function has no derivative, even in a weak sense.

Theorem 2. Let the conditions $f \in C(\bar{Q} \times \mathbb{R})$ and $\partial_{u^i} f(\cdot, \cdot, \cdot, u = \cdot) \in C(\bar{Q} \times \mathbb{R})$ be satisfied. The Cauchy problem (1), (2) has at most one mild solution defined on the set \bar{Q} in the class of measurable functions, which are bounded on every compact subset of \bar{Q} .

The **proof** of the Theorem 2 is carried out by contradiction using the mean value theorem and the Grönwall inequality.

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. Garetto, G. Hyperbolic Second Order Equations with Non-Regular Time Dependent Coefficients / G. Garetto, M. Ruzhansky // Arch. Rational Mech. Anal. – 2005. – Vol. 217. – P. 113–154.
2. Rykov, V.V. Hyperbolic Systems with Multiple Characteristics and Some Applications / V.V. Rykov, A.M. Filimonov // Autom. Remote Control. – 2021. – Vol. 82, № 7. – P. 1262–1270.
3. Korzyuk, V.I. Cauchy Problem for a Semilinear Nonstrictly Hyperbolic Equation on a Half-Plane in the Case of a Single Characteristic / V.I. Korzyuk, J.V. Rudzko. – Berlin, 2023. – 14 p. – (Preprint / ResearchGate GmbH).
4. Zwillinger, D. Handbook of Differential Equations / D. Zwillinger, V. Dobrushkin. 4th ed. – New York : Chapman and Hall/CRC, 2021. – 736 p.
5. Korzyuk, V.I. Classical and Mild Solution of the First Mixed Problem for the Telegraph Equation with a Nonlinear Potential / V.I. Korzyuk, J.V. Rudzko // Izv. Irkutsk. Gos. Univ., Ser. Mat. – 2023. – Vol. 43. – P. 48–63.
6. Korzyuk, V.I. Cauchy Problem for a Nonstrictly Hyperbolic Equation on a Half-Plane with Constant Coefficients / V.I. Korzyuk, I.S. Kozlovskaya, A.I. Kozlov // Differential Equations. – 2015. – Vol. 51, № 6. – P. 726–737.

УДК 616.77, 621.78

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМООБРАБОТКИ СТЕНТ-ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ НИТИНОЛА
Савченко А.Л., Минченя В.Т., Сатторов С., Непогода А.У.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Тема исследования связана с совершенствованием технологии изготовления изделий медицинского назначения. Задачей исследования является анализ влияния условий термообработки нитиноловой проволоки на ее механические характеристики. Предложены перспективные методы повышения качества термообработки стент-элементов из нитинола.

Ключевые слова: нитинол, проволока, термообработка, натяжение, изгибная жесткость.

STUDY OF THE HEAT TREATMENT PROCESS OF NITINOL STENT ELEMENTS

Savchenko A.L., Minchenya V.T., Sattorov S., Nepogoda A.Y.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The topic of the research is related to improving the technology for manufacturing medical products. The objective of the study is to analyze the influence of heat treatment conditions of nitinol wire on its mechanical characteristics. Promising methods have been proposed to improve the quality of heat treatment of nitinol stent elements.

Key words: nitinol, wire, heat treatment, tension, flexural rigidity.

*Адрес для переписки: Савченко А.Л., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: alsavchenko@bntu.by*

Объектом исследования является технологический процесс термообработки изделий из нитиноловой проволоки.

В Научно-технологическом парке БНТУ «Политехник» налажен серийный выпуск стентграфтов [1], в конструкции которых имеются зигзагообразные элементы из нитинола (рисунок 1).



Рисунок 1

Для формообразования таких элементов требуется термообработка с фиксацией требуемой формы. Режим термической обработки определяет температуру, при которой нитинол находится в состоянии сверхупругости, то есть воссоздает форму, запомненную при термообработке. Для термообработки такие элементы размещают на многоместных приспособлениях в виде труб со штифтами для придания проволоке зигзагообразной формы. Для повышения производительности проволока навивается в несколько рядов (например, в 2 ряда), каждый ряд в несколько слоев (количество слоев доходит до де-

сяти). Внешний вид такого приспособления показан на рисунке 2, расположение проволоки на штифтах – на рисунке 3.

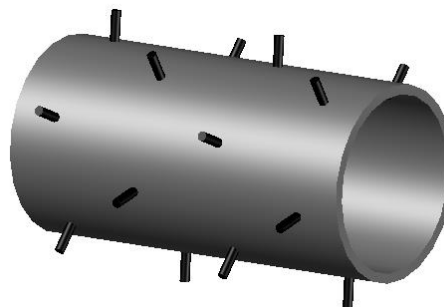


Рисунок 2



Рисунок 3

Проволока навивается с натяжением и помещается в печь непосредственно на приспособлении.

В результате послеоперационного контроля выяснилось, что термообработанные заготовки стент-элементов, даже взятые с одного приспособления, имеют различную изгибную жесткость. В ряде случаев получается, что жесткость недостаточна для использования в стент-графтах.

Ранее, в процессе разработки технологических процессов, исследовались такие параметры, влияющие на механические свойства образцов, как температура термообработки, геометрия готовых изделий и ее изменение в процессе термообработки, режимы охлаждения и другие [2]. Однако в реальных производственных условиях проявился такой нежелательный эффект, который может быть вызван следующими причинами:

- неравномерный нагрев и охлаждение проволоки при термообработке из-за многослойной навивки;
- неравномерное натяжение проволоки при навивке по той же причине;
- изменение размеров и, соответственно, снижение жесткости из-за перехода на новый слой навивки;
- изменение натяжения из-за разности коэффициентов теплового линейного расширения нитинола и стали приспособления.

К сожалению, в производственных условиях сложно обеспечить сортировку термообработанных заготовок по слоям навивки на приспособление, однако, можно сформулировать следующие соображения.

Влияние натяжения проволоки на жесткость термообработанных образцов была рассмотрена ранее [3]. Вместе с тем, полученные результаты требуют уточнения: является ли повышение изгибной жесткости проволоки при снижении натяжения результатом характера термообработки или увеличением радиуса изгиба из-за снижения усилий. По результатам расчетов определяющим фактором является все же влияние условий термообработки.

Проверка неравномерности нагрева и охлаждения проволоки в слоях навивки требует сложных исследований, однако условия термообработки позволяют надеяться на незначительное проявление этого фактора.

Коэффициент теплового линейного расширения нитинола равен от $6,6 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ в мартенситной фазе до $11 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ в аустенитной фазе. Для нержавеющей стали 40X13 тот же показатель заведомо больше – $12,5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$. То есть при нагреве натяжение проволоки будет увеличиваться из-за температурных деформаций. Это следует учитывать при выборе предварительного натяжения.

При переходе на новый слой навивки диаметр полученной заготовки увеличится на удвоенный диаметр проволоки. Для исследования были взяты образцы проволоки диаметром 0,45 мм, то есть диаметр от слоя к слою будет увеличиваться на 0,9 мм.

При переходе к новому слою каждый раз длина наклонного участка зигзага будет увеличиваться примерно на 1,3 %, соответственно на столько же будет уменьшаться изгибная жесткость этого участка. К десятому слою удлинение составит 12 %.

Даже если соединять концы заготовки стент-элемента до получения одного и того же диаметра, геометрия зигзага все равно будет отличаться, что приведет к отличию в жесткости готового стент-элемента. Более того, при использовании заготовки от слоя к слою будет увеличиваться неравномерность жесткости готового стент-элемента в различных направлениях. Поэтому требуется изучить, как геометрия зигзага влияет на радиальную жесткость готового стент-элемента и на равномерность жесткости по окружности.

Таким образом, можно выделить следующие направления исследований процесса термообработки заготовок стент-элементов:

- исследование влияния натяжения проволоки в приспособлении на радиус изгиба и влияние радиуса на жесткость стент-элемента;
- исследование влияния геометрии зигзага стент-элемента на радиальную жесткость готового изделия и ее равномерность по окружности;
- исследование равномерности нагрева и охлаждения проволоки в многоместном приспособлении для термообработки.

Работа выполнена в интересах и при поддержке Научно-технологического парка БНТУ «Политехник».

Литература

1. Разработать оригинальную конструкцию системы аортального стентграфта и внедрить технологию применения системы аортального стентграфта для хирургического лечения аневризм грудной аорты при операциях с искусственным кровообращением [Электронный ресурс] : отчет о НИР (заключительный) : ГБ 03.08-1/2011 / кол. авт. Белорусский национальный технический университет, рук. Минченя В.Т., исполн. Минченя Н.Т., исполн. Савченко А.Л., исполн. Степаненко Д.А. – Электрон. дан. – Минск : [б. и.], 2013. – Н ГР 20113925.
2. НИР «Разработка и исследование конструктивных и технологических параметров формообразования изделий медицинского назначения из никелида титана» в рамках задания 4.1.08 «Разработка и исследование технологии задания формы материалам на основе никелида титана для получения изделий медицинского назначения» [Электронный ресурс]: отчет о НИР (заключ.) / БНТУ; рук. В.Т. Минченя; исполн.: А.Л. Савченко [и др.]. – Минск, 2015. – 120 с. – № ГР 20141055.
3. Богдан, П. С. Влияние натяжения при термообработке на жесткость образцов из нитинола / П.С. Богдан, А.Л. Савченко, В.Т. Минченя // 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. 203–204.

УДК 616-77; 616-073

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И МОДЕЛЕЙ ОРГАНОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭНДОПРОТЕЗОВ

Савченко А.Л.¹, Элмуротова Д.Б.²

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²Ташкентская медицинская академия
Ташкент, Республика Узбекистан

Аннотация. Тема исследования связана с совершенствованием конструкций эндопротезов для кардиологии и ортопедии на основе анализа рентгеновских снимков органов. Ожидаемые результаты выполнения НИР заключаются в установлении оптимальных параметров эндопротезов с высокими показателями совместимости с организмом пациента. Ожидаемые результаты обеспечат теоретическую и экспериментальную основу для производства в Республике Беларусь высокоэффективных эндопротезов для использования в области кардиологии и ортопедии. Использование эндопротезов с конструкцией, учитывающей особенности анатомии пациента позволит улучшить качество жизни людей в послеоперационный период.

Ключевые слова: эндопротезы, рентгеновские снимки, кастомизация, аддитивные технологии.

STUDY OF X-RAY IMAGES AND ORGAN MODELS FOR DESIGNING ENDOPROTHESES

Savchenko A.L.¹, Elmurotova D.B.²

¹Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

²Tashkent medical academy
Tashkent, Republic of Uzbekistan

Abstract. The topic of the research is related to improving the designs of endoprostheses for cardiology and orthopedics based on the analysis of X-ray images of organs. The expected results of the research work are to establish the optimal parameters of endoprostheses with high rates of compatibility with the patient's body. The expected results will provide a theoretical and experimental basis for the production in the Republic of Belarus of highly effective endoprostheses for use in the field of cardiology and orthopedics. The use of endoprostheses with a design that takes into account the peculiarities of the patient's anatomy will improve the quality of life of people in the postoperative period.

Key words: endoprostheses, x-rays, customization, additive technologies.

Адрес для переписки: Савченко А.Л., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: alsavchenko@bntu.by

Эндопротезы для использования в кардиологии и ортопедии достаточно разнообразны. Эндопротезы кровеносных сосудов как правило представляют собой пространственные формы, полученные из металлических и тканевых элементов. К ним относятся стенты, стентграфты, окклюдеры, искусственные клапаны сердца. Неотъемлемым элементом комплекта для установки эндопротеза является система доставки – набор трубок для перемещения эндопротеза через сосудистое русло к месту установки. При этом приходится учитывать проходимость сосудов для системы доставки, поэтому наряду с рекомендациями действующих стандартов возможно использование рентгеновских снимков сосудов для коррекции конструкции системы.

Эндопротезы суставов имеют, на первый взгляд, несложную конструкцию, однако форма рабочих поверхностей может быть достаточно сложной и иметь индивидуальные особенности, без учета которых сложно обеспечить оптимальную биомеханику пациента. Это относится, в первую очередь, к протезам коленных суставов, для изготовления которых можно использовать

цифровые двойники, полученные по результатам рентгеновской съемки.

Качество эндопротезов для челюстно-лицевой хирургии требует особого подхода, так как приходится учитывать кроме функционального еще и косметический аспект. Обеспечение требуемой эстетики имплантов также может осуществляться на основе трехмерных изображений челюстно-лицевой зоны.

Несколько другого подхода требуют импланты для травматологии. Здесь на первое место выходят требования к прочности их установки, что напрямую связано с прочностью костей, следовательно с их формой, размерами и механическими характеристиками. Цифровое проектирование имплантов будет более эффективным при использовании расчетов с участием моделей костей.

Моделирование сосудистого русла выполняется, как правило, с целью анализа механики кровотока и стенок сосудов [1; 2]. Испытания системы доставки включают испытания на возможность проталкивания, которые выполняются в соответствии с нормативно-технической доку-

ментацией в макете сосудистого русла с рекомендуемыми углами изгиба модели. То есть используется усредненный подход вместо возможного индивидуального. Сосудистое русло представляет собой сложную трехмерную структуру, поэтому для построения модели используют компьютерную томографию [3; 4].

Использование трехмерных цифровых моделей органов, полученных на основе изображений или синтезированных связано, в первую очередь, с аддитивными технологиями изготовления протезов с помощью 3D-принтеров [5]. Это направление широко обсуждалось на всероссийской конференции 3D-технологии в медицине в Нижнем Новгороде в феврале 2023 года [6].

По данным новостных каналов ученые Донского государственного технического университета (ДГТУ), Уральского федерального университета (УрФУ) и Первого Московского государственного медицинского университета имени Сеченова работают над совместным проектом по совершенствованию 3D-моделирования на основе томографических снимков. Главная цель заключается в разработке уникального программного комплекса для анализа данных магнитно-резонансной и компьютерной томографии. Работы ведутся с расчетом на аддитивное производство оптимизированных эндопротезов для челюстно-лицевой хирургии.

Эндопротез нижней челюсти является одним из самых востребованных в челюстно-лицевой хирургии. Такой протез, полученный на основе рентгеновских изображений рассматривается в работе [7].

В Российской Федерации передовыми исследовательскими организациями в описываемой области являются Научный центр «Передовые цифровые технологии» (Санкт-Петербург); Передовая инженерная школа «Цифровой инжиниринг» СПбПУ, Центр НТИ «Новые производственные технологии» СПбПУ, Институт передовых производственных технологий СПбПУ, ИЦ «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ, УНИЛ «Вычислительная механика» (CompMechLab) СПбПУ, ООО Лаборатория «Вычислительная механика» (CompMechLab® LLC).

Авторы проекта с узбекской стороны представляют профильную кафедру Ташкентского государственного технического университета «Биомедицинская инженерия». Кафедра занимается научными исследованиями в области исследования методов и средств анализа и обработки медицинских и биологических сигналов и данных, в том числе обработкой рентгеновских изображений.

Научная идея проекта состоит в установлении основных факторов и зависимостей, определяющих

конструкции эндопротезов для обеспечения оптимальной совместимости с организмом пациента с учетом индивидуальных особенностей анатомии.

В Республике Беларусь и Республике Узбекистан исследования в области кастомизации эндопротезов с использованием цифровых моделей и аддитивных технологий будут выполняться впервые.

Ожидаемые результаты выполнения НИР заключаются в установлении оптимальных параметров эндопротезов с высокими показателями совместимости с организмом пациента. Ожидаемые результаты обеспечат теоретическую и экспериментальную основу для производства в Республике Беларусь высокоэффективных эндопротезов для использования в области кардиологии и ортопедии. Использование эндопротезов с конструкцией, учитывающей особенности анатомии пациента позволит улучшить качество жизни людей в послеоперационный период.

Научная значимость состоит в разработке цифровых моделей органов, которые могут быть использованы при дальнейших исследованиях и проектировании средств замены органов.

Практическая значимость состоит в разработке методик проектирования и изготовления эндопротезов с улучшенными физико-механическими, эксплуатационными характеристиками и анатомической совместимостью для применения в области кардиологии и ортопедии.

Литература

1. Башарова, Г. Моделирование в 3D-пакете и биомеханическое исследование состояния кровеносных сосудов, питающих мозг / Г. Башарова, П.И. Бегун, О.В. Тихоненкова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. Научный журнал. – 2018. – Том 6, № 3. – С. 30–38.
2. Бегун, П.И. Биомеханическое моделирование объектов протезирования: учебное пособие / П.И. Бегун. – СПб. : Политехника, 2011. – 464 с.
3. Носова, С.А. Построение модели кровеносных сосудов и их исследование по данным компьютерной томограммы / С.А. Носова // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2014. – № 1 (2). – С. 265–269.
4. Olufsen, M.S. Modeling the Arterial System with Reference to an Anesthesia Simulator. Technical report, IMFUFA Text 345,1998. Roskilde University, Denmark, Ph.D. Thesis.
5. Сорокин, В. Аддитивные технологии в медицине: перспективы развития, ближайшие ориентиры, долгосрочные цели / В. Сорокин // Аддитивные технологии. – 2023. – № 2. – С. 58–68.
6. 3D-технологии в медицине / С.И. Гажва [и др.] // Аддитивные технологии. – 2023. – № 2. – С. 70–77.
7. Эндопротез нижней челюсти с опорными зонами как искусственный орган / А.И. Шайхалиев [и др.] // Вестник трансплантологии и искусственных органов. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 115–122.

УДК 616.77, 621.78

ВЛИЯНИЕ НАТЯЖЕНИЯ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ НА ЖЕСТКОСТЬ ОБРАЗЦОВ ИЗ НИТИНОЛА

Савченко А.Л., Богдан П.С., Минченя В.Т., Сатторов С., Непгода А.Ю.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Тема исследования связана с совершенствованием изделий медицинского назначения. Задачей исследования является анализ влияния натяжения нитиноловой проволоки при термообработке на ее механические характеристики. Показано, что при увеличении силы натяжения изгибная жесткость образцов снижается.

Ключевые слова: нитинол, проволока, термообработка, натяжение, изгибная жесткость.

EFFECT OF TENSION DURING HEAT TREATMENT ON THE RIGIDITY OF NITINOL SPECIMENS

Savchenko A.L., Bogdan P.S., Minchenya V.T., Sattorov S., Nepogoda A.Y.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The research topic is related to the improvement of medical devices. The task of the study is to analyze the influence of the tension of the nitinol wire during heat treatment on its mechanical characteristics. It is shown that with an increase in the tension force, the bending rigidity of the samples decreases.

Key words: nitinol, wire, heat treatment, tension, flexural rigidity.

*Адрес для переписки: Савченко А.Л., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: alsavchenko@bntu.by*

Объектом исследования является сплав никелид титана (нитинол) и технологические процессы формообразования изделий из проволоки на его основе.

Для формообразования пространственных структур из нитиноловой проволоки требуется термообработка с фиксацией требуемой формы. Режим термической обработки определяет температуру, при которой нитинол находится в состоянии сверхупругости, то есть воссоздает форму, запомненную при термообработке.

Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» выпускает ряд изделий для кардиохирургии из нитиноловой проволоки. В частности, налажен серийный выпуск стентграфтов, в конструкции которых имеются зигзагообразные элементы их нитинола (рисунок 1).



Рисунок 1

Для термообработки такие элементы размещают на многоместных приспособлениях в виде

труб со штифтами для придания проволоке зигзагообразной формы. Экспериментальный вариант такого приспособления показан на рисунке 2 [1].

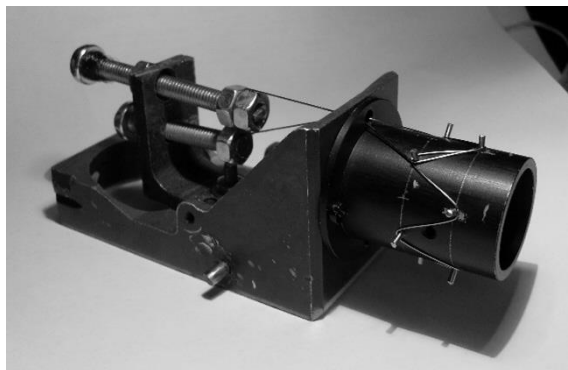


Рисунок 2

После навивки на штифты проволока натягивается и в таком состоянии вместе с приспособлением помещается в печь.

При разработке технологического процесса термообработки исследовались такие параметры, влияющие на механические свойства образцов, как температура термообработки, геометрия готовых изделий и ее изменение в процессе термообработки, режимы охлаждения и другие [2]. Тем не менее, выяснилось, что часть образцов имеют при рабочей температуре недостаточную жесткость, то есть при выходе из системы доставки стентграфт может иметь значительную остаточную деформацию. В ходе анализа технологического процесса возникло подозрение, что при навивке проволоки на приспособление различные участки могут иметь различное натяжение, что может привести к

отличиям в механических характеристиках этих участков после термообработки. Поэтому были выполнены экспериментальные исследования влияния натяжения при термообработке на жесткость образцов из нитинола.

Для исследования были взяты образцы проволоки Ti-44,48; Ni-49,16; Cu-6,02 фирмы «Фукарава» (Япония) диаметром 0,45 мм, используемой для изготовления каркасов стент-графтов.

Было разработано приспособление (рисунок 3), в котором проволока навивалась на штифты и фиксировалась после задания натяжения динамометром. В результате получались Λ -образные элементы одинакового размера.



Рисунок 3

Одновременно на оправку устанавливалось несколько образцов с разным натяжением, которые вместе с приспособлением подвергались термической обработке. После этого образцы снимались и подвергались измерению жесткости в приспособлении, которое позволяло измерять усилие деформации образцов на заданный угол, в данном случае 30° (рисунок 4).

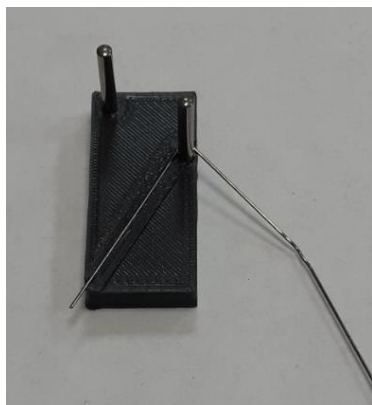


Рисунок 4

Результаты измерения приведены в таблице 1.

Таблица 1 Результаты измерений

Усилие натяжения, Н	Усилие деформации, Н
0	1,7
5	1,5
10	1,4
30	1,2
50	0,95
70	0,7
90	0,45

Видно, что при увеличении натяжения жесткость образцов снижается. Для наглядности это показано на графике (рисунок 5).

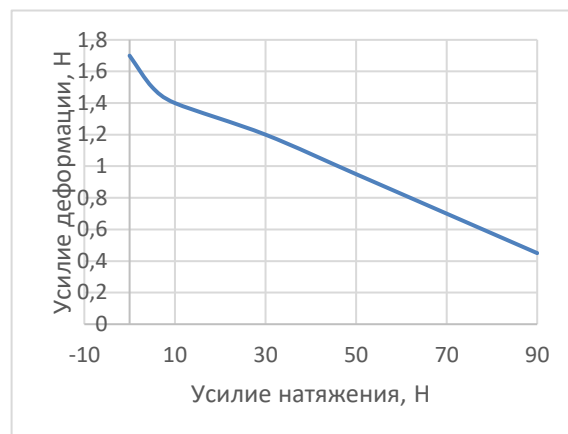


Рисунок 5

Технологические особенности процесса термической обработки не позволяют выполнять ее с нулевым натяжением проволоки, так как при этом сложно обеспечить требуемую форму. Но при навивке следует обеспечивать одинаковое натяжение всех ветвей зигзага, чтобы в результате обеспечить одинаковую жесткость элементов. Для этого предлагаются некоторые изменения в конструкцию приспособлений. В частности, предлагается использовать меньшее количество слоев навивки и изменить механику натяжения. Эти меры должны привести к снижению трения между проволокой и элементами приспособления и, следовательно, увеличить равномерность натяжения.

Работа выполнена в интересах и при поддержке Научно-технологического парка БНТУ «Политехник».

Литература

1. Разработать оригинальную конструкцию системы аортального стентграфта и внедрить технологию применения системы аортального стентграфта для хирургического лечения аневризм грудной аорты при операциях с искусственным кровообращением [Электронный ресурс] : отчет о НИР (заключительный) : ГБ 03.08-1/2011 / кол. авт. Белорусский национальный технический университет, рук. Минченя В.Т., исполн. Минченя Н.Т., исполн. Савченко А.Л., исполн. Степаненко Д.А. – Электрон. дан. – Минск : [б. и.], 2013. . – N ГР 20113925.
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 (заключ.) / БНТУ; рук. В.Т. Минченя; исполн.: А.Л. Савченко [и др.]. – Минск, 2015. – 120 с. – Библиогр.: с. 117–120. – № ГР 20141055.

УДК 621.81

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ УПРАВЛЯЕМОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МАЛОЖЕСТКИХ КОЛЕЦ

Антонюк В.Е.¹, Яворский В.В.², Сандомирский С.Г.¹

¹ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

²ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ»
Жодино, Республика Беларусь

Аннотация. Описаны преимущества и проблемы производства изделий кольцераскаткой. Для повышения точности изготовления мало жестких колец и снижения остаточных напряжений в них предложена методика управляемого охлаждения – циклическое нагружение кольца при остывании. Объяснено ее преимущество перед другими видами правки. Даны рекомендации по созданию экспериментальной установки для устранения возникших в процессе производства мало жестких колец деформаций и снятия остаточных напряжений в них. Разработанные рекомендации использованы при проектировании установки. Они обеспечат реализацию методики управляемого охлаждения мало жестких колец при их изготовлении кольцераскаткой на Белорусском автомобильном заводе.

Ключевые слова: кольцераскатка, остаточные напряжения, циклическое нагружение, динамическая стабилизация, охлаждение.

EXPERIMENTAL AND PRODUCTION PLANT FOR CONTROLLED COOLING OF LOW RIGID RINGS

Antonyuk V.E.¹, Yavorski V.B.², Sandomirski S.G.¹

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

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, stiffness, residual stresses, cyclic loading, dynamic stabilization, cooling.

Адрес для переписки: Сандомирский С.Г., ул. Академическая, 12, г. Минск, 220012, Республика Беларусь
e-mail: sand_work@mail.ru

Кольцераскатку широко используют в автомобилестроении, авиационной, космической и химической промышленности [1]. В ее основе лежит пластическое деформирование материалов, которое позволяет создавать ответственные детали с высокими точностью и механическими свойствами. Производство мало жестких деталей является приоритетным и актуальным направлением и для отечественного машиностроения. Основой технологии их изготовления является кольцераскатка в горячем состоянии (рисунок 1), при которой возникает специфическая геометрическая погрешность в виде овальности изготовленных мало жестких колец.

При охлаждении кольца происходит его температурная усадка и коробление. Точность колец зависит от ряда факторов и может различаться при изготовлении одних и тех же видов колец для разных производств. Кроме того, при механической и термической обработке деталей возникают остаточные напряжения,

изменяющие геометрические размеры и форму изделий при эксплуатации.



Рисунок 1 – Процесс кольцераскатки

Поиски эффективных технологических методов решения задачи стабилизации размеров и снижения остаточных напряжений в процессе изготовления таких деталей продолжают [2].

Для повышения точности кольцевых заготовок малой жесткости путем устранения погрешности в виде овальности, предложена технология их охлаждения и стабилизации, основанная на управлении тепловыми деформациями кольцевой заготовки при охлаждении.

Управляемое охлаждение заключается в охлаждении кольцевых заготовок с одновременным действием на их циклического нагружения при постоянном геометрическом параметре заготовки.

По изобретению [3] циклическое силовое воздействие на кольцевое изделие 1 внутренним радиусом r осуществляют в радиальных направлениях по внутреннему периметру изделия в противоположных от оси изделия направлениях силами разжима P (рисунок 2).

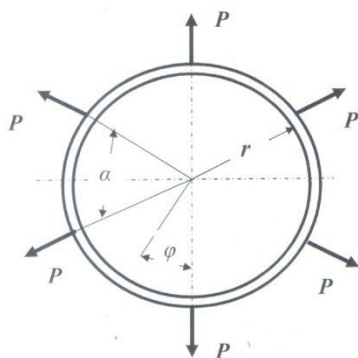


Рисунок 2 – Схема нагружения кольцевой заготовки 6-ю равномерно распределенными радиальными силами

При этом однополярная сила разжима P , благодаря кольцевой форме изделия 1, создает в его материале растягивающие усилия противоположного направления. Приложение сил разжима P в противоположных от оси изделия 1 направлениях (рисунок 2) обеспечивает устойчивое положение изделия 1 в процессе стабилизации его размеров. Силовое воздействие на изделие 1, в соответствии с [3], обеспечивает создание в материале изделия 1 напряжений нужной величины σ_m для всех ступеней, изделия из которых подвергают стабилизации размеров.

Экспериментальная установка для стабилизации маложестких колец основана на нагружении кольца рычажно-шарнирным механизмом двухстороннего действия (рисунок 3).

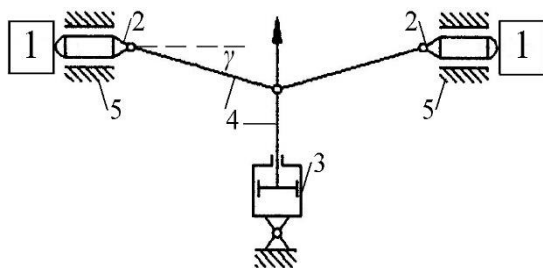


Рисунок 3 – Схема нагружения в маложесткого кольца 1 плунжерами 2 в устройстве по патенту [3], 3 – гидропривод, 4 – рычажно-шарнирный механизм, 5 – корпус, γ – угол наклона рычага

Количество вращательных перемещений сил P разжима вдоль внутренней поверхности кольца устанавливают из расчета воздействия на материал кольца до 200 циклов нагружения. Количество циклов с максимальным нагружением, обеспечивающим создание в материале кольца напряжений величиной σ_m и расположенных в циклограмме нагружения симметрично относительно ее центра – до 60. Схема циклограммы нагружения, согласно которой должны меняться растягивающие напряжения в изделии, представлена на рисунке 4.

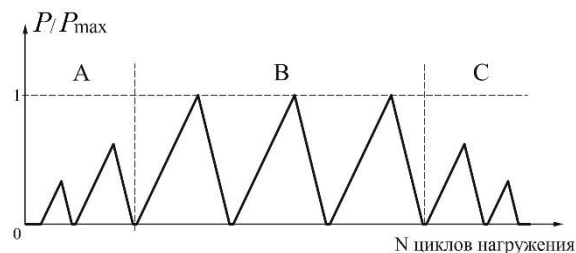


Рисунок 4 – Схема циклограммы динамической стабилизации маложестких колец по [3]

Циклограмма динамической стабилизации должна состоять из участков A , B и C (рисунок 4). На участке A происходит рост нагрузки до начала возникновения в материале кольца 1 напряжений на уровне от 0,9 до 0,95 предела текучести σ_T материала кольца при температуре стабилизации и возникновения петли механического гистерезиса. На участке B ширина петли гистерезиса материала кольца стабилизируется. На участке C петля гистерезиса материала закрывается. На всех участках нагружение должно быть циклическим с достижением расчетного уровня нагружения.

В докладе рассчитаны перемещения элементов рычажно-шарнирного модуля устройства. Разработаны режимы работы установки. Ее использование обеспечит реализацию методики управляемого охлаждения маложестких колец, планируемых изготовлению методом кольцераскатки на Белорусском автомобильном заводе.

Литература

1. Антонюк, В.Е. Кольцераскатка в условиях автоматизированного производства / В.Е. Антонюк, П.А. Пархомчик, В.В. Рудый. – Минск : Беларуская навука, 2021. – 245 с.
2. Антонюк, В.Е. Динамическая стабилизация маложестких колец после кольцераскатки / 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 // Афіц. бюл. 2023. № 2.

УДК 620.18:537.62:534.22

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА АКУСТИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 65Г

Пилипчук А.П.¹, Степаненко Д.А.², Бурак В.А.^{2,3}, Киндрук А.Н.²

¹УО «Военная академия Республики Беларусь»

²Белорусский национальный технический университет

³Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрено влияние термообработки (закалки и отпуска при различных температурах) на акустические и магнитные свойства стали 65Г. Показано, что магнитные характеристики являются более чувствительными к фазовому составу образца по сравнению с акустическими. Полученные результаты могут быть использованы для разработки простого в реализации метода неразрушающего контроля качества термообработки сталей в случаях, когда качество термообработки оказывает критическое влияние на эксплуатационные свойства и надежность стальных конструкций.

Ключевые слова: термообработка, закалка, отпуск, фазовый состав, скорость звука, остаточная намагниченность.

EFFECT OF HEAT TREATMENT ON ACOUSTIC AND MAGNETIC PROPERTIES OF 1065 STEEL

Pilipchuk A.P.¹, Stepanenko D.A.², Burak V.A.^{2,3}, Kindruk A.N.²

¹Military academy of the Republic of Belarus

²Belarusian National Technical University

³Institute of applied physics of the National academy of science of Belarus

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article considers effect of heat treatment (quenching and tempering at different temperatures) on acoustic and magnetic properties of 1065 steel. It is shown that magnetic properties are more sensitive to phase content of the sample in comparison with acoustic ones. The obtained results can be used for development of simple in implementation non-destructive method for controlling quality of heat treatment in the cases, when this quality has critical effect on operation properties and reliability of steel structures.

Key words: heat treatment, quenching, tempering, phase content, sound velocity, remanent magnetization.

Адрес для переписки: Степаненко Д.А., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: dstepanenko@bntu.by

Изменение фазового состава сталей при термообработке существенно влияет на их эксплуатационные свойства и поэтому его контроль чрезвычайно важен для критических применений, в которых от свойств стальных конструкций зависит безопасность человека, в частности, в броневой защите. Обычно фазовый состав определяется по металлографическим шлифам, однако этот метод является деструктивным и может быть неточным при незначительных изменениях состава. К современным методам определения фазового состава относится метод рентгеновской дифракции, однако он требует применения сложного и дорогостоящего оборудования. С учетом сказанного представляет интерес создание простых в реализации неразрушающих методов контроля фазового состава, основанных на измерении коррелирующих с условиями термообработки физических свойств стали. Примерами подходящих характеристик являются акустические и магнитные свойства [1].

Для измерений использовались образцы стали 65Г со следующими режимами термообработки:

1. Закалка на мартенсит. Температура 815 °С, выдержка 9 мин (для образцов в виде пластин размером 200×150×6 мм), охлаждение в воде.

2. Без обработки (горячекатаный прокат).

3. Закалка (с режимами, указанными в п. 1) + отпуск. Температура отпуска 450 °С, выдержка 1,5 часа, охлаждение на воздухе.

4. Закалка + отпуск. Температура отпуска 510 °С, выдержка 1,5 часа, охлаждение на воздухе.

Скорость звука измерялась эхо-импульсным методом с помощью дефектоскопа УД2-12 с совмещенным преобразователем с рабочей частотой 5,0 МГц. Для этого из пластин вырезались цилиндрические образцы диаметром 40 мм. Для минимизации влияния качества поверхности на результаты измерений образцы шлифовались с двух сторон. Обработка всех образцов за один установ обеспечивала их равную толщину (5,474 мм). Акустический контакт между преобразователем и образцами обеспечивался с помощью тонкого слоя трансформаторного масла. Эхо-сигналы записывались с помощью цифрового осциллографа UTD2102С, вход которого подключался к гнезду контроля видеосигнала дефектоскопа. Точное измерение временного интервала Δt между последовательными эхо-сигналами затруднялось наличием шумов, в связи с чем он определялся автокорреляционным методом. Расчет автокорре-

ляционной функции производился с помощью программы Mathcad.

В качестве магнитной характеристики образцов был выбран градиент нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности ∇H_m , измерявшийся с помощью импульсного магнитного анализатора ИМА-6. Перед измерениями образцы, приобретшие случайную остаточную намагниченность при шлифовании на магнитной плите, размагничивались в поле электромагнита. Начальное намагничивание образцов производилось в поле с амплитудой $|H| = 250$ кА/м, после чего определялась величина ∇H_m по одному из трех вариантов:

1. После снятия намагничивающего поля.

2. После снятия намагничивающего поля и частичного размагничивания полем с амплитудой $|H_p| = 30$ кА/м, противоположным по отношению к намагничивающему полю.

3. После снятия намагничивающего поля и частичного размагничивания полем с амплитудой $|H_p| = 70$ кА/м.

Результаты измерений скорости звука представлены на рисунке 1.

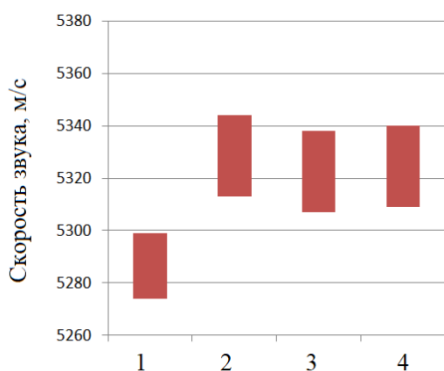


Рисунок 1 – Результаты измерений скорости звука

Как видно, между образцами 2–4 не наблюдается статистически значимых различий, что ограничивает применимость акустического метода для контроля фазового состава. Недостатком акустического метода также является необходимость предварительной подготовки (шлифования) поверхностей контролируемых изделий. Мартенситная структура (образец 1) характеризуется статистически значимым снижением скорости звука по сравнению с образцами 2–4. Теоретически повышение модуля упругости при закалке на мартенсит должно приводить к росту скорости звука,

однако помимо модуля упругости на скорость звука влияют степень искажения кристаллической решетки и упругая анизотропия, более сильно выраженные в мартенсите и приводящие к снижению скорости звука [1].

Результаты измерений величины ∇H_m представлены на рисунке 2.

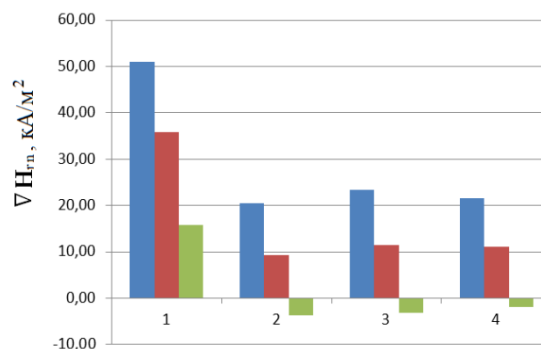


Рисунок 2 – Результаты измерений величины ∇H_m

Как видно, образец с мартенситной структурой является трудно размагничиваемым (магнитотвердым) и имеет очень значительное (до 2,5 раз) различие в магнитных свойствах по сравнению с образцами 2–4. Между образцами 2–4, как и в случае со скоростью звука, не наблюдается значительного различия, что объясняется близкими фазовыми превращениями, проходящими при рассматриваемых температурах отпуска. Возможным способом увеличения чувствительности остаточной намагниченности к структурному состоянию является выбор величины размагничивающего поля $|H_p|$, соответствующей равной или близкой к нулю величине градиента остаточной намагниченности на образце, подвергнувшемся термообработке при максимальной или минимальной из рассматриваемых температур.

Магнитный метод контроля фазового состава по сравнению с акустическим не предъявляет повышенных требований к качеству поверхности образцов, а также дает объемную оценку фазового и структурного состояния, позволяющую нивелировать возможные погрешности, связанные с несовершенством структуры образца.

Литература

- Gür, C.H. Comparison of magnetic Barkhausen noise and sound velocity measurements for characterisation of steel microstructures / C.H. Gür, İ. Çam // 9th European Conference on NDT. – Berlin, 2006.

УДК 666.7

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГЛИНИСТЫХ КОМПОНЕНТОВ
В ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕРМОСТОЙКИХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКОГО ВОЛЛАСТОНИТА**

Попов Р.Ю.¹, Дятлова Е.М.¹, Пантелеенко Ф.И.², Самсонова А.С.¹, Драенкова Е.Ю.¹

¹*Белорусский государственный технологический университет*

²*Белорусский национальный технический университет*

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Показана возможность применения различных глинистых компонентов для получения синтетического волластонита из отечественных сырьевых материалов. Представлены результаты исследований свойств термостойких керамических изделий; установлены закономерности изменения физико-технических характеристик и рентгеноструктурных показателей керамики на основе различного природного сырья. Результаты исследований могут использоваться для производства деталей в литейные установки, применяться в качестве конструктивных элементов печей (индукционных, закалочных, печей отжига), лещадок, подставок, плит, элементов дугогасительных камер.

Ключевые слова: глинистые компоненты, синтетический волластонит, техническая керамика, температурный коэффициент линейного расширения, синтез.

**STUDY OF THE POSSIBILITY OF USING CLAY COMPONENTS
IN THE PRODUCTION OF HEAT-RESISTANT CERAMIC MATERIALS
BASED ON SYNTHETIC WOLLASTONITE**

Popov R. Yu.¹, Dyatlova E. M.¹, Panteleenko F. I.², Samsonova A. S.¹, Draenkova E. Yu.¹

¹*Belarusian State Technological University*

²*Belarusian National Technical University*

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The possibility of using various clay components to obtain synthetic wollastonite from domestic raw materials is shown. The results of studies of refractory ceramic products are presented; patterns of changes in physical and technical characteristics and X-ray structural parameters of ceramics based on various natural raw materials have been established. The results of the research can be used for the production of parts for foundry installations, used as structural elements of furnaces (induction, hardening, annealing furnaces), docks, stands, plates, elements of arc-extinguishing chambers.

Key words: clay components, synthetic wollastonite, technical ceramics, temperature coefficient of linear expansion, synthesis.

*Адрес для переписки: Самсонова А.С., ул. Белорусская, 21, г. Минск, 220006, Республика Беларусь
e-mail: misakamadara@yandex.by*

Условия применения материала определяют такие свойства, как термостойкость, тепловое расширение при нагреве и химическая инертность по отношению к заливаемому металлу. В качестве таких материалов для изготовления керамических форм используют оксиды, силикаты, глиноземы, силициды, карбиды, бориды, нитриды и интерметаллические соединения. Из всего многообразия материалов в промышленном производстве применяют лишь ограниченную группу керамики. Наиболее перспективными керамическими материалами для литья алюминия и его сплавов являются огнеприпасы на основе силикатов, а именно синтезированного волластонита [1–3]. Это обосновано тем, что стоимость сырьевых материалов для синтеза волластонита не велика и приемлема для производства, а полученные материалы обладают необходимыми свойствами и соответствуют предъявляемым требованиям.

Целью данной работы является получение волластонитсодержащих термостойких изделий

для кокильного литья алюминиевых сплавов из природного сырья с получением необходимых физико-химических и термомеханических характеристик.

Разработка керамических материалов на основе синтетического волластонита осуществлялась в нескольких направлениях при разном соотношении глинистого компонента. В первом случае использовалось отечественное сырье: карбонатсодержащее (мел), в качестве кремнеземсодержащее (трепел). Пластификатором выступала огнеупорная глина Веселовского месторождения. Количество компонентов изменялось в пределах: мел (36–42 мас. %), трепел (42–48 мас. %), глина (10–20 мас. %). Во втором случае применялось следующее сырье: карбонатсодержащее (мел), кремнеземсодержащее (трепел). Пластифицирующим компонентом являлась глина месторождения «Крупейский сад».

Изготовление опытных образцов осуществлялось в виде цилиндров диаметром 12 мм методом

полусухого прессования при давлении 20–25 МПа. Обжиг материалов проводился в интервале температур 1000–1200 °С с выдержкой при максимальной температуре 1 ч. Результаты измерения физико-химических свойств экспериментальных образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Физико-химические свойства опытных образцов

Номер состава	Свойства образцов при температуре обжига, °С				
	1000	1050	1100	1150	1200
	Водопоглощение, %				
1	24,0	23,3	22,1	21,9	21,5
2	30,2	29,7	28,4	27,3	26,1
3	29,4	29,2	28,1	26,5	25,8
4	22,3	26,8	25,3	24,6	23,9
5	29,9	29,0	27,9	26,7	25,0
6	28,8	27,7	26,9	26,3	26,1
	Кажущаяся плотность, кг/м ³				
1	1696	1700	1717	1742	1760
2	1500	1512	1537	1553	1565
3	1517	1524	1552	1566	1578
4	1631	1628	1650	1657	1628
5	1525	1535	1538	1547	1612
6	1573	1600	1621	1636	1559
	Открытая пористость, %				
1	40,7	39,6	38,5	37,6	36,9
2	45,3	44,9	43,7	42,2	40,4
3	44,8	44,5	43,6	41,5	39,8
4	43,7	41,2	40,6	39,6	38,9
5	45,6	44,5	42,9	41,3	40,3
6	45,3	44,3	43,6	42,7	41,0

В ходе исследования были установлены зависимости свойств керамики от состава и температуры синтеза.

Отмечается, что с увеличением температуры обжига в материале наблюдаются закономерные процессы спекания: фиксируется постепенное увеличение кажущейся плотности керамики при снижении открытой пористости и водопоглощения. Это связано, как с изменением фазового состава керамических масс и с формированием расплава, так и изменением его свойств: вязкости, проникающей способности, смачивающих характеристик. В целом, при термическом воздействии в области исследуемых температур (1000–1200 °С) наблюдается уменьшение водопоглощения образцов. Присутствие аморфных форм основных компонентов, гидратных оболочек, или примесных составляющих в исходных сырьевых материалах способствует активизации процессов фазообразования и спекания керамики, а также снижению температуры синтеза продукта.

Механическая прочность при сжатии материалов, полученных на основе масс исследуемой системы, в зависимости от состава, находится в пределах 0,8–25,3 МПа (обожженных при температуре 1000 °С); 3,8–26,9 МПа (при температуре обжига 1050 °С); 4,7–29,7 МПа (при 1100 °С) и

9,6–69,0 МПа при температуре 1150 °С. На прочностные свойства керамики большое влияние оказывает ее пористость. В процессе спекания происходит уменьшение пористости, формируется более плотная структура, повышается прочность связей между компонентами керамических масс. Высокая активность к спеканию волластонита дает возможность повысить механическую прочность керамики. Повышение прочности материала связано с эффектом армирования кристаллами волластонита (что вызвано особенностью габитуса кристалла), которые в процессе синтеза прорастают в веществе и связывают все элементы массы друг с другом, образуя внутреннюю сетку, наподобие композитов. В интервале температур 1000–1200 °С наблюдается некоторое уменьшение ТКЛР. Это может быть обусловлено формированием волластонита в керамике, его размещением в структуре материала, который распределяясь по разным направлениям, имея дощатое строение кристаллов и обладая анизотропией свойств (в т. ч. и различным расширением по кристаллографическим осям), нивелирует общее расширение материала. В результате материал обладает следующими значениями ТКЛР – $\alpha = (4,56–8,13) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ в области исследуемых температур. Исследование фазового состава оптимального состава методом рентгенофазового анализа позволяет сделать выводы о том, что при температуре обжига 1150 °С полиминерален и представлен волластонитом CaSiO_3 , параволластонитом, псевдоволластонитом, кварцем SiO_2 , тридимитом SiO_2 . Фазовый состав образцов, обожженных при температуре 1150 °С представлен, преимущественно, волластонитом CaSiO_3 . Это свидетельствует о том, что реакции между CaO и SiO_2 с образованием волластонита протекают более полно и образцы практически не содержат сопутствующих кристаллических фаз. Это очень важно, так как свободный CaO значительно снижает качество огнеприпаса.

В результате проведенных исследований установлена возможность применения отечественной глины месторождения «Крупейский сад» для получения керамических материалов на основе синтетического волластонита.

Литература

1. Волочко, А.Т. Огнеупорные и тугоплавкие керамические материалы / А.Т. Волочко, К.Б. Подболотов, Е.М. Дятлова. – Минск : Беларуская навука, 2013. – 384 с.
2. Спекание керамических масс на основе природного волластонита / Л.Н. Русанова [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. – 2008. – № 5. – С. 39–44.
3. Дятлова, Е.М. Теплоизоляционные материалы на основе кремнеземсодержащего сырья / Е.М. Дятлова, О.А. Сергиевич, М.А. Руба // Огнеупоры и техническая керамика. – 2019. – № 6. – С. 31–40.

УДК 517.97:615.47

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПЛАСТИН ДЛЯ ОСТЕОСИНТЕЗА

Степаненко Д.А., Мудинов И., Билейчик А.А., Охремчик В.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Описана методика топологической оптимизации конструкций фиксирующих пластин, применяемых в травматологии для экстремедулярного остеосинтеза, с использованием программы *COMSOL Multiphysics*. Оптимизированные варианты конструкции обеспечивают снижение массы пластины на 49–54 %, а продольной жесткости – на 43–53 %, что является положительным эффектом с точки зрения минимизации явления экранирования напряжений. Для проверки полученных теоретических результатов и проведения экспериментальных исследований изготовлены опытные образцы пластин из стали *AISI 430 (12X17)*.

Ключевые слова: остеосинтез, переломы костей, фиксирующие пластины, топологическая оптимизация, эффект экранирования напряжений.

TOPOLOGY OPTIMIZATION OF BONE PLATES FOR OSTEOSYNTHESIS

Stepanenko D.A., Mudinov I., Bileichyk H.A., Akhremchik V.A.

*Belarusian national technical university
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The article describes methodology of topological optimization for design of bone plates used in traumatology for extramedullary osteosynthesis based on application of *COMSOL Multiphysics* software. Optimized variants of design enable mass reduction up to 49–54 % and reduction of longitudinal stiffness up to 43–53 %, which is a positive effect for minimization of stress shielding phenomenon. For verification of the obtained theoretical results and implementation of experimental studies prototypes of plates were manufactured from *AISI 430 steel*.

Key words: osteosynthesis, bone fractures, fixation plates, topology optimization, stress shielding effect.

*Адрес для переписки: Степаненко Д.А., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: dstepanenko@bntu.by*

Переломы костей являются одним из самых распространенных видов травм. Существующие методы их лечения можно разделить на консервативные, например, наложение гипсовых повязок после закрытой репозиции костных отломков, и хирургические. Разновидностью хирургических методов является накостный (экстремедулярный) остеосинтез, при котором отломки фиксируются в правильном взаимном положении, достигнутом путем репозиции, с помощью пластин-фиксаторов, соединяемых с костью шурупами или винтами.

В настоящее время для создания оптимальных конструкций ортопедических имплантатов широко используется метод топологической оптимизации. В отличие от оптимизации формы, в которой возможные варианты конструкции формируются из исходного путем деформации существующих границ, топологическая оптимизация допускает формирование новых границ, например, отверстий в изначально сплошном материале, то есть допускает изменение топологии. Результатом топологической оптимизации обычно является создание облегченной по массе конструкции изделия, не уступающей по своим характеристикам базовой конструкции из сплошного материала. Существует несколько подходов к решению задач топологической оптимизации: эволюционная структурная оптимизация, метод

плотности и метод гомогенизации. При использовании метода плотности область оптимизации разбивается на конечные элементы, каждому из которых в конечной оптимизированной топологии может соответствовать нулевое значение безразмерной плотности $\theta = 0$ (отсутствие материала) или единичное значение плотности $\theta = 1$ (наличие материала). В результате решения задачи оптимизации плотность распределяется таким образом, чтобы минимизировать податливость конструкции при ограничении верхнего предела массы, например, 50 % от исходного значения. Расчетное распределение плотности помимо значений 0 и 1 может содержать промежуточные значения, которые не могут быть физически реализованы при изготовлении изделия из сплошного материала. Для устранения промежуточных значений плотности используют такие приемы как проецирование плотности и бинарная классификация.

В данной работе предложена методика топологической оптимизации пластин для остеосинтеза с применением программы *COMSOL Multiphysics*. Проведен сравнительный анализ характеристик (продольной жесткости, массы и максимального напряжения по Мизесу) базовой конструкции пластины (прямоугольной пластины с крепежными отверстиями) и двух оптимизированных вариантов, полученных при различных

значениях порога классификации расчетных значений плотности. Положение и форма крепежных отверстий в процессе оптимизации сохранялись неизменными за счет создания вокруг них кольцевых областей с предписанным значением плотности $\theta = 1$. В целях сравнительного анализа характеристик базовой конструкции пластины и двух оптимизированных вариантов проводился статический анализ всех трех вариантов конструкции. Граничные условия, нагрузки, свойства материала и параметры конечно-элементной сетки сохранялись такими же, как и при топологической оптимизации. Качественно оптимизированная топология пластин согласуется с результатами, полученными другими исследователями [1; 2].

В результате оптимизации было получено расчетное распределение плотности θ_r (значение плотности после штрафования (пенализации) промежуточных значений), представленное на рисунке 1.



Рисунок 1 – Расчетное распределение плотности

Для получения физически реализуемой топологии пластины необходимо избавиться от элементов, для которых плотность принимает значения $0 < \theta_r < 1$. Для этого расчетное распределение плотности было линейным образом преобразовано в полутоновое графическое изображение в формате BMP с уровнями интенсивности от 0 до 255, соответствующими изменению плотности от 1 до 0. Затем была выполнена бинарная классификация изображения с помощью программы MathCad. В зависимости от выбранного порога классификации были получены два варианта топологии (рисунок 2).

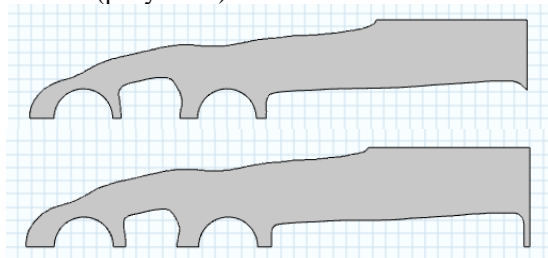


Рисунок 2 – Варианты топологии пластины

В первом случае пороговое значение интенсивности было принято равным 50, а во втором – 200.

Оптимизированные варианты конструкции обеспечивают снижение массы пластины на 49–54 %, а продольной жесткости – на 43–53 %, что является положительным эффектом с точки зрения снижения степени экранирования напряжений (разгрузка кости от действия нормальных физиологических напряжений, вызванная высокой жесткостью крепежных пластин и приводящая к снижению минеральной плотности и прочности костной ткани). Максимальное напряжение по Мизесу повышается для оптимизированных конструкций на 19–27 % по сравнению с базовой, что не является критичным при наличии достаточного запаса прочности у исходной конструкции. Оптимизированные варианты конструкции различаются по характеру деформаций и поэтому должны быть дополнительно исследованы с точки зрения клинической эффективности.

Для проверки полученных теоретических результатов и проведения экспериментальных исследований были с помощью метода лазерной резки изготовлены опытные образцы из стали AISI 430 (12X17) (рисунок 3).



Рисунок 3 – Опытные образцы пластин

Сверху представлен базовый вариант конструкции, внизу – оптимизированная конструкция.

В дальнейших исследованиях планируются экспериментальное изучение характеристик изготовленных опытных образцов, а также проведение топологической оптимизации пластин на основе более реалистической трехмерной модели.

Литература

1. Gogarty, E. Hierarchical topology optimization for bone tissue scaffold: preliminary results on the design of a fracture fixation plate / E. Gogarty, D. Pasini // Engineering and Applied Sciences Optimization. – Heidelberg : Springer, 2015. – P. 311–340.
2. Khalaf, A.A. Evolutionary structural optimization of steel gusset plates / A.A. Khalaf, M.P. Saka // Journal of Constructional Steel Research. – 2007. – Vol. 63. – P. 71–81.

УДК 546.26.539

**ЭЛЕКТРОННЫЙ ПАРАМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ
ДЕЙТЕРИЯ И ОТОЖЖЕННЫХ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 1665 °С ПЛЕНКАХ CVD АЛМАЗА**

**Олешкевич А.Н.¹, Хомич А.В.², Сернов С.П.³, Нгуен Тхи Тхань Бинь⁴,
Лапчук Т.М.¹, Лапчук Н.М.¹**

¹*Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

²*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Фрязино, Российская Федерация*

³*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

⁴*Куанг Бинь университет,
Провинция Куанг Бинь, Вьетнам*

Аннотация. В работе рассмотрены особенности облучения ионами дейтерия пленок CVD алмаза и на основе анализа спектров ЭПР изучено влияние на их структуру и свойства последующего высокотемпературного отжига. Анализ полученных результатов позволил сделать выводы о природе дефектов и возможности создания на их основе, с участием ионов дейтерия, стабильных магнитоупорядоченных структур в пленках CVD алмаза, что имеет важное значение для дальнейшего развития и применения этих материалов.

Ключевые слова: электронный парамагнитный резонанс; ионы дейтерия; пленки CVD алмаза; высокотемпературный отжиг; магнитоупорядоченные структуры.

**ELECTRON PARAMAGNETIC RESONANCE IN CVD DIAMOND FILMS IRRADIATED WITH
DEUTERIUM IONS AND ANNEALED AT A TEMPERATURE OF 1665 °C**

**Oleshkevich A.N.¹, Khomich A.V.², Sernov S.P.³, Nguyen Thi Thanh Binh⁴,
Lapchuk T.M.¹, Lapchuk N.M.¹**

¹*Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus*

²*Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS
Fryazino, Russian Federation*

³*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

⁴*Quang Binh university
Quang Binh province, Vietnam*

Abstract. The work examines the features of irradiation of CVD diamond films with deuterium ions, and based on the analysis of ESR spectra, the effect of subsequent high-temperature annealing on their structure and properties is studied. Analysis of the results obtained allowed us to draw conclusions about the nature of defects and the creation on their basis with the participation of deuterium ions of stable magnetically ordered structures in CVD diamond films, which is important for the further development and application of these materials.

Keywords: electron paramagnetic resonance; deuterium ions; CVD diamond films; high-temperature annealing; magnetically ordered structures.

*Адрес для переписки: С.П. Сернов, пр. Независимости, 63, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
e-mail: ssernov@bntu.by*

Развитие электронного приборостроения на алмазе различного структурного совершенства [1] сдерживается недостатком знаний о собственных и примесных дефектах в алмазе [2], т. е. связано как с проблемой получения высококачественного синтетического сырья, так и с развитием методов его диагностики, что подчеркивает актуальность проведенных исследований.

Цель работы – изучение имплантированных ионами дейтерия и отожженных в вакууме поликристаллических CVD алмазных пленок с целью проверки гипотезы об ответственности водородсодержащих радиационных дефектов за проявление магнитного порядка в алмазах.

Методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) исследованы: 1) исходная пленка CVD алмаза, 2) исходная пленка CVD алмаза после отжига при $T = 1665$ °С и 3) имплантированные ионами дейтерия с $E = 350$ кэВ и дозой $D = 1,2 \cdot 10^{17}$ см⁻² пленки CVD алмаза с последующим их отжигом при $T = 1665$ °С. Сравнение спектров ЭПР исходного и исходного отожженного при той же температуре, что и имплантированный ионами дейтерия CVD алмаз, проводилось для установления роли дейтерия в формировании структур с магнитным упорядочением. По своим оптическим и теплофизическим свойствам использовавшаяся в данной работе CVD алмазная

пленка толщиной 0,5 мм и содержанием азота на уровне $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ не уступала лучшим природным кристаллам. Концентрация связанного водорода, находящегося в CVD алмазах на межкристаллитных границах, не превышала $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$.

Спектр ЭПР исходной пленки CVD алмаза представляет симметричную линию лоренцевой формы с g -фактором 2,00355, величина которого не характерна для алмаза, и может быть объяснена значительным влиянием высокой концентрации водорода в этих пленках. После отжига при $T = 1665 \text{ }^\circ\text{C}$, как видно из рисунка 1, а, линия ЭПР становится асимметричной, g -фактор уменьшается и становится равным 2,00275, что является характерным показателем для поликристаллических алмазов, осажденных из газовой фазы. Вследствие отжига при $T = 1665 \text{ }^\circ\text{C}$ имплантированной ионами дейтерия пленки алмаза линия спектра ЭПР, как видно из рисунка 1, б, становится симметричной, g -фактор снова возрастает до значения 2,0039 и наблюдается его анизотропия относительно направления поляризующего магнитного поля.

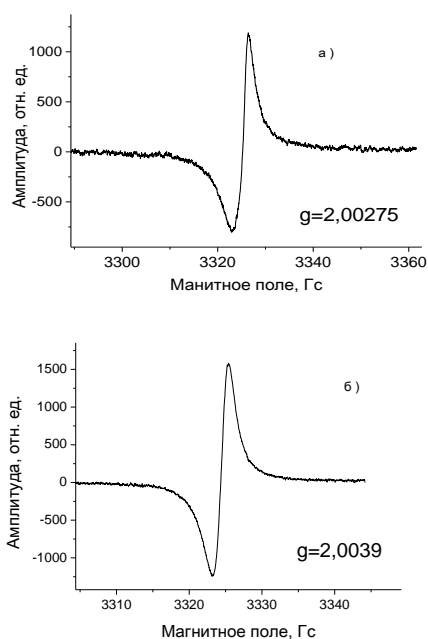


Рисунок 1 – Спектры ЭПР: а – исходной пленки CVD алмаза после отжига при $T = 1665 \text{ }^\circ\text{C}$; б – имплантированной ионами дейтерия пленки CVD алмаза после отжига при $T = 1665 \text{ }^\circ\text{C}$

При исследовании зависимости величины g -фактора от ориентации образца CVD алмаза относительно направления поляризующего магнитного поля в резонаторе, было зафиксировано, что исходная пленка до и после отжига при температуре $T = 1665 \text{ }^\circ\text{C}$ демонстрируют совпадение значений g -фактора при полном обороте образца в магнитном поле. Для объяснения природы данного явления были исследованы зависимости величины

резонансного поля в пленках CVD алмаза от ориентации образца в магнитном поле в полярных координатах. Обнаружено, что для исходной и отожженной при $T = 1665 \text{ }^\circ\text{C}$ пленок алмаза значение резонансного поля остается неизменным при полном обороте образца в магнитном поле (рисунок 2, а), а в случае имплантированной ионами дейтерия пленки CVD-алмаза, прошедшей отжиг при аналогичной температуре, наблюдается отличие в значениях резонансного поля при полном обороте образца в резонаторе (рисунок 2, б).

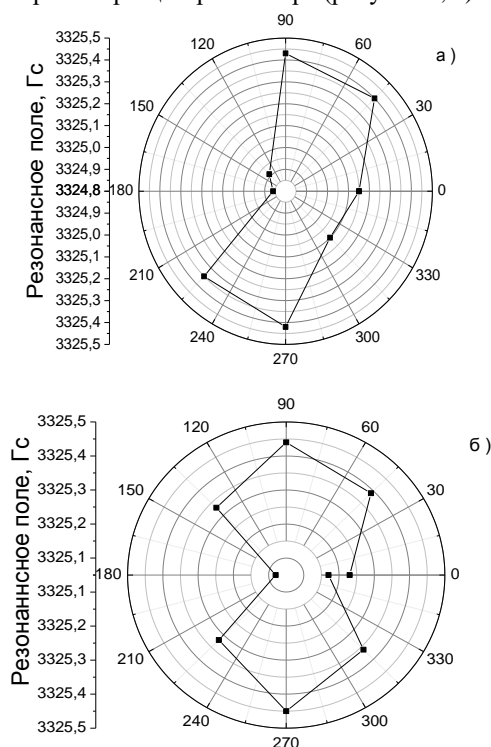


Рисунок 2 – Зависимость величины резонансного поля в спектрах ЭПР от ориентации образца в магнитном поле: а – исходной пленки CVD алмаза после отжига при $T = 1665 \text{ }^\circ\text{C}$; б – имплантированной ионами дейтерия пленки CVD алмаза, отожженной при $T = 1665 \text{ }^\circ\text{C}$

Установлено наличие высокотемпературного магнитного упорядочения в пленках поликристаллического CVD алмаза, имплантированного ионами дейтерия и отожженного при $T = 1665 \text{ }^\circ\text{C}$, явившееся следствием формирования скоплений (ассоциатов) не скомпенсированных электронных спинов [3].

Литература

1. Ральченко, В.Г. CVD-алмазы: применение в электронике / В.Г. Ральченко, В.И. Конов // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2007. – № 4. – С. 58–67.
2. Poklonskaya, O.N. Paramagnetism of CVD diamonds irradiated with neutrons / O.N. Poklonskaya // Doklady Natsional'noy Akademii Nauk Belarusi. – 2013. – Vol. 57(5). – P. 49–54. (In Russian).
3. McConnell, H.M. Ferromagnetism in solid free radicals / H.M. McConnell // Journal of Chemical Physics. – 1963. – Vol. 39(7). – P. 49–54.

УДК 902.65

ПРОЦЕССЫ ГИДРОКСИЛИРОВАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ДАТИРОВКИ АРХЕОЛОГИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ

Степаненко Д.А., Коляда Е.А., Запольская К.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрены методика и результаты экспериментальных исследований процессов накопления воды в образцах археологической гончарной керамики. Полученные результаты хорошо согласуются с известными положениями теории транспорта воды в пористых средах и результатами, полученными другими исследователями при изучении археологической керамики регидроксиляционным методом. Уточнение и развитие предложенной методики исследований позволит получать на ее основе количественные оценки возраста керамических изделий.

Ключевые слова: керамические материалы, гончарная керамика, археологическая керамика, датировка, гидроксילирование.

HYDROXYLATION PROCESSES OF CERAMIC MATERIALS AND POSSIBILITY OF THEIR APPLICATION FOR DATING OF ARCHAEOLOGICAL POTTERY

Stepanenko D.A., Kaliada E.A., Zapolskaya K.V.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The article considers methodology and results of experimental studies of water accumulation in the samples of archaeological pottery. Obtained results are in good agreement with the known postulates of the theory of water transport in porous media and with results obtained by other researchers during studies of archaeological pottery by means of rehydroxylation method. Updating of the suggested methodology of studies will enable qualitative estimation of the age of ceramic objects.

Key words: ceramic materials, pottery, archaeological pottery, dating, hydroxylation.

*Адрес для переписки: Степаненко Д.А., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: dstepanenko@bntu.by*

Большое внимание в археологии уделяется изделиям из керамики, которые важны не только как самостоятельные предметы исторического и культурного наследия, но и как маркеры для датировки сопутствующих археологических находок. Что касается датировки самой керамики, то она может производиться по типологическим признакам (форме и декору сосудов, технологии их изготовления и т. п.), а также с помощью физико-химических методов.

Все известные методы датировки археологических объектов принято делить на абсолютные и относительные. Абсолютные методы позволяют определять точный возраст исследуемых объектов и включают в себя радиоуглеродный, калий-аргоновый и аргон-аргоновый методы, а также методы урановых серий и треков. Подходящими для датировки керамики являются радиоуглеродный, термолюминесцентный и археомагнитный методы, а также метод оптически-стимулированной люминесценции, однако, они имеют определенные недостатки. Например, в радиоуглеродном методе существует проблема наличия в образце разновозрастного углерода. Термолюминесцентный метод является деструктивным. Археомагнитный метод имеет проблемы с однозначностью. Помимо указанных недостатков все эти методы сложны в реализации.

В 2009 году была предложена новая, простая методика регидроксиляционной датировки керамических объектов [1], уточнение и развитие которой является актуальной темой, так как открывает много перспектив для датировки археологических объектов и находок в будущем.

В качестве объектов исследования были выбраны два образца, собранных при сборе подъемного материала на городище на реке Менка. Типологически образец № 1 относится к XI веку, а образец № 2 – к XV веку.

Для изучения объектов был использован метод регидроксиляционной датировки. В его основу положено дегидроксилирование (удаление групп ОН («кристаллической» воды) из кристаллической решетки глинистых минералов) путем нагрева исследуемых образцов до высокой температуры с последующим весовым контролем кинетики накопления «кристаллической» воды в ходе повторного гидроксילирования (регидроксилирования): первичное гидроксילирование происходит после обжига керамики при ее изготовлении.

Процесс датировки регидроксиляционным методом можно разделить на следующие этапы:

1. Определение начальной массы образца.
2. Высушивание образца при температуре 120 °С до достижения постоянной массы m_1 и полного удаления капиллярной воды.

3. Выдержка образца в контролируемых атмосферных условиях до достижения постоянной массы m_2 (регидратация образца).

4. Нагрев образца при температуре 550 °С до достижения постоянной массы m_3 и полного удаления всех типов воды.

5. Выдержка образца в контролируемых атмосферных условия, как на этапе 3. Происходят процессы регидратации и регидроксилирования.

Получаемая на этапе 5 кривая зависимости изменения массы образца от времени в степени 1/4 имеет два участка: начальный нелинейный, характеризующийся параллельным накоплением капиллярной и «кристаллической» воды, и линейный, на котором происходит накопление только «кристаллической» воды после насыщения образца капиллярной водой. Предполагается, что линейный характер зависимости $\Delta m(t^{1/4})$ на участке регидроксилирования является универсальным для всех образцов керамики, что подтверждается статистическими данными [1]. Определение возраста требует знания двух параметров: коэффициента α_m наклона линейного участка кривой $m(t^{1/4})$ и значения m_4 массы, получаемого экстраполяцией линейного участка кривой до пересечения с осью массы. Возраст определяется по формуле $t = ((m_4 - m_2)/\alpha_m)^4$.

Взвешивание образцов осуществлялось на лабораторных весах Ohaus Explorer с точностью 0,1 мг. Нагрев образцов производился в программируемой печи ЭКПС-10. Для образцов массой 2,5–3,5 г суммарная продолжительность высушивания при температуре 120 °С составила 13–13,5 часов. Выдержка образцов в контролируемых атмосферных условиях осуществлялась в эксикаторе с насыщенным раствором хлорида натрия, обеспечивающим постоянное значение относительной влажности (около 75 %).

Пример кривой регидратации, полученной для образца № 1 на этапе 3, представлен на рисунке 1.

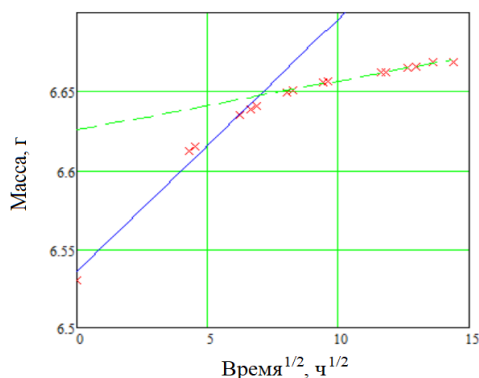


Рисунок 1 – Кривая регидратации образца

Кривая содержит два участка, на которых масса линейно зависит от времени в степени 1/2.

Подобная зависимость характерна для транспорта воды в пористых средах: в частности, известно уравнение Ричардса, согласно которому изменение массы воды в почве в процессе сорбции описывается линейной функцией $m(t^{1/2})$ [2].

Линейная зависимость $m(t^{1/2})$ также наблюдается для пористых строительных материалов, например, бетонов [3]. Билинейный характер зависимости объясняется наличием в образце разномасштабной пористости: начальный участок кривой соответствует быстрому капиллярному заполнению мелких пор, а последующий участок – медленному заполнению более крупных пор в результате диффузионного растворения захваченного в них воздуха [3].

На рисунке 2 приведен пример кривой изменения массы, полученной для образца № 2 на этапе 5.

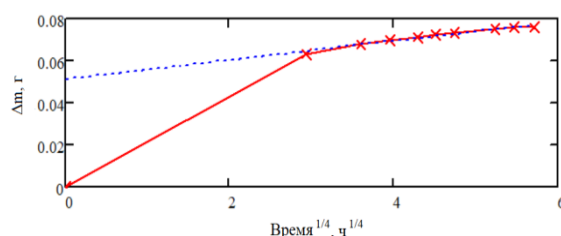


Рисунок 2 – Кривая изменения массы образца

Как предсказывает теория, кривая имеет участок с близкой к линейной зависимостью $\Delta m(t^{1/4})$. Значение α_m/m_4 составило $1,717 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1/4}$, что согласуется с литературными данными: $(1,8-5,8) \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1/4}$ [1]. Анализ экспериментальных данных в log-log осях [2] показывает, что они наиболее точно описываются зависимостью $\Delta m \sim t^\beta$ с показателем степени $\beta = 0,267-0,269$, близким к теоретическому значению 0,25.

Таким образом, результаты исследований образцов регидроксиляционным методом не противоречат известным положениям теории транспорта воды в пористых средах и наблюдениям других авторов. Для получения количественных оценок возраста требуется дальнейшее уточнение и совершенствование методики проведения исследований.

Литература

1. Dating fired-clay ceramics using long-term power law rehydroxylation kinetics / M.A. Wilson [et al.] // Proceeding of the Royal Society A. – 2009. – Vol. 465. – P. 2407–2415.
2. Generalized Richards' equation to simulate water transport in unsaturated soils / Y. Pachepsky [et al.] // Journal of Hydrology. – 2003. – Vol. 272. – P. 3–13.
3. A hydro-thermo-mechanical multiphase model for long-term water absorption into air-entrained concrete / D. Eriksson [et al.] // Transport in Porous Media. – 2019. – Vol. 127. – P. 113–141.

УДК 620.18:537.62:534.22

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКОЙ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Степаненко Д.А., Еромин Е.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрена методика управления режимами магнитно-абразивной обработки прецизионных плоских поверхностей, обеспечивающая равномерность съема припуска с обрабатываемой поверхности. Зависимость съема припуска от режимов обработки рассчитывается на основе модели Престона, применяемой для описания процессов финишной абразивной обработки. Режимы обработки, обеспечивающие заданный закон съема припуска, рассчитываются путем решения обратной задачи. Так как данная задача является плохо обусловленной, то она решается с использованием регуляризации по Тихонову, позволяющей получить более гладкие решения, более простые для технической реализации.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, детерминистическая обработка, обратные задачи, плохо-обусловленные задачи, регуляризация.

INVERSE PROBLEMS OF DETERMINISTIC FINISHING OF PRECISION PLANAR SURFACES

Stepanenko D.A., Eromin E.S.

*Belarusian national technical university
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The article considers methodology for controlling machining parameters of magnetic-abrasive finishing of precision planar surfaces providing uniform material removal from the machined surface. Dependence between material removal and machining parameters is derived from Preston's model usually used for description of abrasive finishing processes. Machining parameters necessary for realization of the prescribed law of material removal are calculated from solution of inverse problem. Since this problem is ill-posed, it is solved using Tikhonov's regularization providing more smooth solutions with simpler engineering implementation.

Key words: magnetic-abrasive finishing, deterministic machining, inverse problems, ill-posed problems, regularization.

*Адрес для переписки: Степаненко Д.А., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: dstepanenko@bntu.by*

При финишной обработке прецизионных плоских поверхностей важны как качество обработанной поверхности (шероховатость и глубина дефектного слоя), так и отклонения ее формы. Например, для сверхплоских кремниевых подложек параметр TTV (отклонение толщины по пластине) не должен превышать 1 мкм при диаметре пластины 150 мм. Минимизация погрешностей формы, возникших на предшествующих этапах обработки, возможна за счет контролируемого съема припуска в процессе финишной обработки, описываемого как «детерминистическая обработка». Задачи, возникающие при моделировании формообразования прецизионных поверхностей, можно разделить на прямые, состоящие в определении функции распределения съема припуска по поверхности при заданных режимах обработки, и обратные, состоящие в определении режимов обработки, обеспечивающих заданное распределение съема припуска. Таким образом, разработка алгоритма детерминистической обработки сводится к решению обратной задачи моделирования процесса формообразования. В данной работе рассматривается методика решения подобных задач на примере магнитно-абразивной финишной обработки (МАФО), являющейся перспективным методом обработки прецизионных плоских поверхностей.

В основу описания процесса МАФО положена модель Престона, согласно которой скорость съема припуска при полировании пропорциональна давлению p инструмента на обрабатываемую поверхность и скорости v движения точки поверхности относительно инструмента:

$$RR(\rho, \varphi, t) = k,$$

$$p(\rho, \varphi, \rho_c(t), \varphi_c(t))v(\rho, \varphi, \rho_c(t), \varphi_c(t)),$$

где k – коэффициент, зависящий от условий обработки.

Положение точек поверхности и оси инструмента описывается полярными координатами (ρ, φ) и (ρ_c, φ_c) , т. к. рассматривается обработка осесимметричной заготовки радиусом R , совершающей вращательное движение с угловой скоростью Ω . Осесимметричный инструмент радиусом r (полосный наконечник станка) предполагается совершающим радиальное поступательное движение относительно заготовки со скоростью v_r и вращательное движение с угловой скоростью ω .

Для получения уравнений обратной задачи рассматривается одномерная функция распределения съема припуска:

$$h_{1D}(\rho) = h(\rho, 0),$$

которая представляется в виде суммы пооборотных функций съема

$$h_{1D}(\rho) = \sum_{k=1}^{N+1} \int_{t(k)}^{t(k+1)} RR(\rho, 0, t) dt = \sum_{k=1}^{N+1} h_k(\rho),$$

где $(t(k), t(k+1))$ – интервал времени, соответствующий k -му обороту заготовки.

В случае детерминистической обработки параметры ρ и v изменяются контролируемым образом в зависимости от времени (числа оборотов заготовки), что может быть описано взвешенным суммированием пооборотных функций съема:

$$h_{1D}(\rho) = \sum_{k=1}^{N+1} w_k h_k(\rho),$$

где весовые коэффициенты w_k определяются законом изменения параметров обработки.

Это позволяет сформулировать обратную задачу в дискретной (матричной) форме

$$\{h\}w = h_{\text{opt}},$$

где h_{opt} – вектор оптимального распределения съема припуска (требуемая одномерная функция распределения съема, дискретизированная по радиальной координате ρ), w – вектор весовых коэффициентов (каждый элемент которого соответствует одному обороту заготовки), $\{h\}$ – матрица пооборотного съема припуска (каждый столбец которой представляет собой дискретизированную одномерную функцию съема для одного оборота заготовки).

Так как матрица $\{h\}$ в общем случае является прямоугольной, то для определения вектора w весовых коэффициентов требуется использование псевдообратной матрицы Мура-Пенроуза:

$$\{h\}^\dagger = (\{h\}^T \{h\})^{-1} \{h\}^T,$$

$$w = \{h\}^\dagger h_{\text{opt}},$$

где индекс T обозначает транспонирование.

Матрица $\{h\}^T \{h\}$ является плохо обусловленной, в результате чего расчет решения обратной задачи с помощью матрицы Мура-Пенроуза дает достаточно точное (в смысле величины отклонения $\|\{h\}w - h_{\text{opt}}\|$, где $\|\cdot\|$ – евклидова норма) решение, однако распределение весовых коэффициентов w_k является недостаточно гладким, что затрудняет или делает невозможным соответствующее управление режимами обработки. Сглаживание решения и улучшение обусловленности задачи могут быть достигнуты регуляризацией по Тихонову, описываемой уравнением

$$w = (\{h\}^T \{h\} + \lambda I)^{-1} \{h\}^T h_{\text{opt}},$$

где $\lambda > 0$ – параметр регуляризации, I – единичная матрица.

В качестве примера на рисунке 1 представлено распределение весовых коэффициентов, полученное путем решения нерегуляризованной (а) и регуляризованной (б) обратных задач.

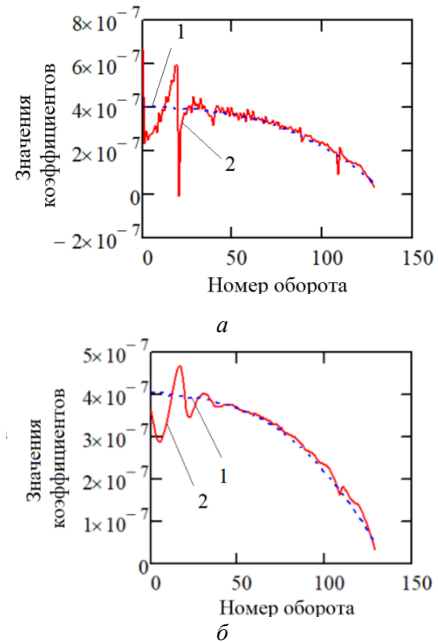


Рисунок 1 – Расчетное распределение весовых коэффициентов: 1 – расчет по эмпирическим формулам [1], 2 – решение обратной задачи

Расчет проводился для трапецидального оптимального распределения съема припуска с равномерным распределением съема в центральной части радиуса заготовки и линейным снижением на краях. Расчетное распределение съема припуска представлено на рисунке 2.

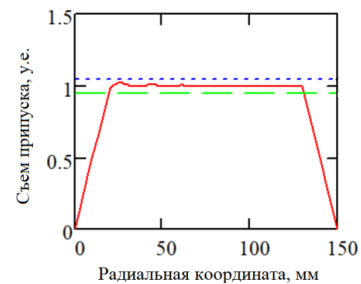


Рисунок 2 – Расчетное распределение съема припуска

Как видно, для равномерной части кривой отклонение величины съема от постоянного значения не превышает $\pm 5\%$. При расчете весовых коэффициентов по эмпирическим формулам [1] отклонение от равномерности более значительно.

Литература

1. Stepanenko, D.A. Modeling of spraying with time-dependent material feed rate / D.A. Stepanenko // Applied Mathematical Modelling. – 2007. – Vol. 31. – P. 2564–2576.

УДК 621.3.078

СИНТЕЗ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА ЭЛЕКТРОПРИВОДА С МОМЕНТНЫМ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Горячев О.В., Ефромеев А.Г., Степочкин А.О.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация

Аннотация. В современных робототехнических комплексах и оптико-электронных системах широко применяются моментные электродвигатели с высокоэнергетическими постоянными магнитами. Вопросы анализа и синтеза систем электропривода на их основе достаточно широко освещены в литературе, однако неизменно актуальными остаются вопросы разработки методики синтеза подобных систем с учетом специфики их математического описания. В работе предложен вариант синтеза алгоритма управления электроприводом данного типа с использованием нечеткого регулятора на основе принципов модельно-ориентированного проектирования. Рассмотренный подход к синтезу регулятора позволяет сократить время разработки описанных систем при обеспечении выполнения заданных требований технического задания.

Ключевые слова: моментный электродвигатель, нечеткий алгоритм управления.

SYNTHESIS OF A FUZZY CONTROLLER FOR ELECTRIC DRIVE WITH TORQUE MOTOR

Goryachev O.V., Efromeev A.G., Stepochkin A.O.

Tula State University
Tula, Russian Federation

Abstract. In modern robotic complexes and optical-electronic systems, torque electric motors with high-energy permanent magnets are widely used. The issues of analysis and synthesis of electric drive systems based on them are quite widely covered in the literature, but the issues of developing a methodology for the synthesis of such systems, taking into account the specifics of their mathematical description, remain invariably relevant. The paper proposes a version of the synthesis of a control algorithm for an electric drive of this type using a fuzzy controller based on the principles of model-based design. The considered approach to controller synthesis makes it possible to reduce the development time of the described systems while ensuring that the specified requirements of the technical specifications are met.

Key words: torque electric motor, fuzzy control algorithm.

Адрес для переписки: Степочкин А.О., пр. Ленина, 95, г. Тула, 300012, Российская Федерация
e-mail: s.a.o.1984@yandex.ru

Введение. Использование модельно ориентированного проектирования (МОП) позволяет эффективно осуществлять разработку систем электропривода, удовлетворяющих современным жестким требованиям к заданному комплексу характеристик. Основой МОП является модель объекта управления или процесса [1], а конечной целью – программная реализация синтезированного алгоритма управления, которая может быть получена, в частности, с помощью *MATLAB Simulink Coder* либо кодогенератора пакета *SimInTech*. Рассматриваемая система электропривода реализована на базе моментного исполнительного двигателя (ИД) с векторным управлением моментом и нечетким регулятором. Модель системы векторного управления моментным двигателем рассмотрена, в частности, в [2]. Моделирование системы управления для асинхронного двигателя с регулятором на основе нечеткой логики представлено в работе [3]. В представленной работе акцент сделан на особенности разработки модели системы управления с учетом специфики математического описания элементов электропривода.

Разработка модели электропривода. Важнейшим этапом синтеза электропривода является

анализ и поэлементное математическое описание его функциональных элементов итогом которого является получение модели располагаемой части системы, которая может быть декомпозирована на модели информационной и силовой подсистем. Математическое описание элементов системы целесообразно начинать с силовой подсистемы, определяющей регулируемые выходные фазовые координаты привода (скорость, угол поворота). Ключевым ее элементом является ИД, представляющий собой трехфазную синхронную электрическую машину математическое описание которой, подробно рассмотренное в [4], базируется на известных уравнениях Лагранжа-Максвелла и отражает инерционность процессов электромагнитного и электромеханического преобразования энергии.

Полученную модель трехфазной синхронной электрической машины целесообразно привести к эквивалентной двухфазной, что позволяет уменьшить число уравнений, описывающих ее работу для чего используется координатное преобразование Кларк. Силовым преобразователем в рассматриваемой системе выступает автономный инвертор напряжения, математическое описание

которого отражает инерционность процесса электромагнитного преобразования энергии в силовых ключах и представлено в [5]. Модель информационной подсистемы в данном случае включает в себя нечеткий регулятор и подсистемы, реализующие векторное управление моментом ИД [6]: блок перекомпенсации и блоки координатных преобразований Парк. Полученная Simulink-модель электропривода представлена на рисунке 1.

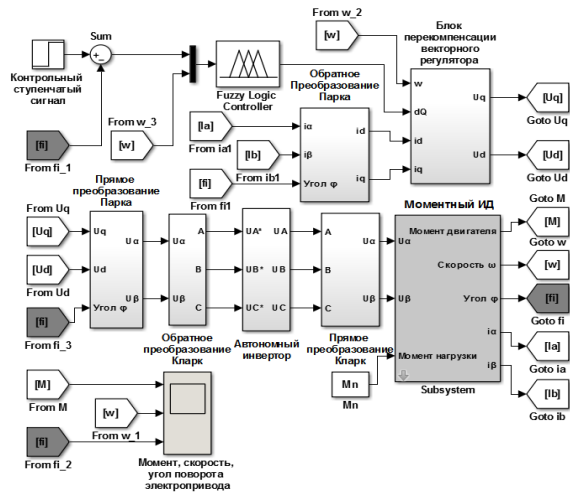


Рисунок 1 – Simulink-модель электропривода

Синтез нечеткого регулятора. Нечеткий алгоритм управления позволяет добиться высокой эффективности управления в системах где большое количество нелинейных элементов математического описания усложняют линеаризацию и создание эквивалентной упрощенной модели.

В данном случае определяются две входные лингвистические переменные: «ошибка» и «скорость», для каждой определяется терм множество и формируются функции принадлежности, представленные на рисунке 2.

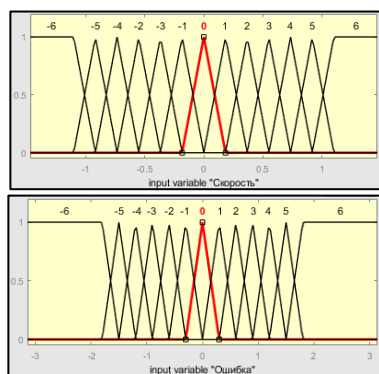


Рисунок 2 – Функции принадлежности

Поверхность функции преобразования нечеткого регулятора представлена на рисунке 3.

Полученные с помощью модели с регулятором расчетные переходные процессы для ключевых фазовых координат системы электропривода представлены на рисунке 4.

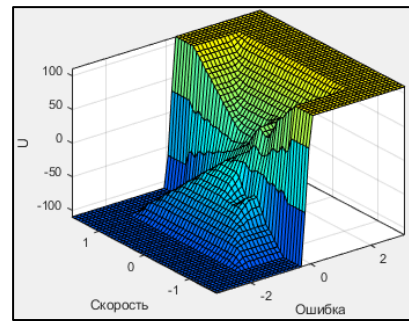


Рисунок 3 – Функция преобразования нечеткого регулятора

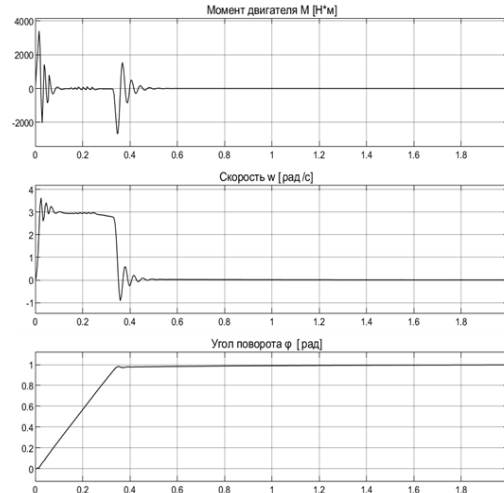


Рисунок 4 – Расчетные переходные процессы

Анализ расчетных динамических характеристик системы показывает эффективность применения нечеткого регулятора при реализации системы управления электроприводом.

Заключение. В работе представлен один из подходов к разработке алгоритма управления электропривода на базе моментного ИД. Показана целесообразность применения МОП для решения широкого круга задач анализа и синтеза подобных систем. Рассмотрены принципы разработки модели привода и методика синтеза нечеткого регулятора.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме FEWG-2022-0003.

Литература

1. Громашева, О.С. Модельно-ориентированный подход для автоматизации генерации программного кода для встраиваемых систем из модели MATLAB/SIMULINK / О.С. Громашева, М.Е. Дьяченко, Д.А. Оськин // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 10. – С. 92–97.
2. Фролов, В.Я. Разработка системы бездатчикового векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами в Matlab Simulink / В.Я. Фролов, Р.И. Жилиготов // Записки Горного института. – 2018. – Т. 229. – С. 92–97.
3. Моделирование системы прямого управления моментом асинхронного двигателя с регулятором на

основе нечеткой логики в Simulink / М.Г. Данилова [и др.] // Инженерный Вестник Дона. – 2017. – № 2.

4. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин: уч. для вузов. – 3-е изд. перераб. и доп. / И.П. Копылов. – М. : Высшая школа. 2001. – 327 с.

5. Калачев, Ю.Н. Преобразователи автономных источников электроэнергии / Ю.Н. Калачев, А.Г. Александров. – М. : ДМК Пресс, 2021. – 80 с.

6. Калачев, Ю.Н. Векторное управление (заметки практика) / Ю.Н. Калачев. – М., 2013.

УДК 620.179.14

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ РАЗНОТОЛЩИННОЙ ЛИСТОВОЙ СТАЛИ 12X18N10T

Чернышев А.В., Шарандо В.И., Кременькова Н.В., Пиунов В.Д.

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

Аннотация. Исследовано влияние степени пластической деформации образцов из листа стали 12X18N10T толщиной 1 мм, наружных и внутренних слоев листа этой же стали толщиной 10 мм, на амплитуды вносимой ЭДС и ее третьей гармонической составляющей накладного вихретокового преобразователя. Изучены возможности и условия применения этих методов измерений для контроля процесса деформационного образования ферромагнитной фазы. Показано, что он протекает наиболее интенсивно во внутренних слоях толстого листа и наименее активно в тонком листе.

Ключевые слова: электромагнитный контроль, аустенитная сталь, пластическая деформация, толщина.

ELECTROMAGNETIC CONTROL OF DEFORMATION PROCESSES OF 12Cr18Ni10Ti SHEET STEEL WITH DIFFERENT THICKNESSES

Chernyshev A.V., Sharando V.I., Kremenkova N.V., Piunov V.D.

*Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The influence of the degree of plastic deformation of specimens from a sheet of steel 12Cr18Ni10Ti with a thickness of 1 mm, the outer and inner layers of a sheet of the same steel with a thickness of 10 mm, on the amplitudes of the introduced EMF and its third harmonic component of the superimposed eddy current transducer was studied. The possibilities and conditions of application of these methods of measurements for controlling the process of deformation formation of the ferromagnetic phase have been studied. It is shown that it proceeds most intensively in the inner layers of thick sheet and least actively in a thin sheet.

Key words: electromagnetic control, austenitic steel, plastic deformation, thickness.

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

Выпускаемые промышленностью нержавеющей стали непосредственно после изготовления имеют преимущественно парамагнитную γ -структуру. Их механическая обработка может приводить к возникновению ферромагнитной α -фазы – мартенсита деформации. В работе [1] рассмотрена возможность изучения процессов пластической деформации толстолистовой стали 12X18N10T по измерениям амплитуды третьей гармонической составляющей выходной ЭДС накладного преобразователя. В [2] исследовано влияние толщины пластически деформированных образцов из этой стали на амплитуды вносимой ЭДС накладного вихретокового преобразователя и ее третьей гармонической составляющей. Установлено, что изменение обеих амплитуд прекращается с достижением толщин образцов 2–3 мм.

Целью настоящей работы являлось получение зависимостей амплитуд вносимой ЭДС и ее третьей гармонической составляющей от степени деформации образцов, выполненных из

промышленно выпущенного тонкого листа стали 12X18N10T, а также слоев на поверхности и в глубине ее толстого листа.

Проводились измерения амплитуды E вносимой ЭДС накладного вихретокового преобразователя, состоящего из трех расположенных соосно катушек – поля возбуждения, измерительной и компенсационной. Две последние располагались у торцов катушки поля возбуждения и были включены дифференциально между собой. Наружный диаметр всех катушек 10 мм. По катушке поля возбуждения пропускался синусоидальный ток частотой 2,5 кГц.

Амплитуда третьей гармонической составляющей E_3 выходной ЭДС измерялась с помощью прибора ПКТ-2 [3].

Для получения образцов из наружного и среднего слоев стального листа толщиной 10 мм в состоянии поставки были вырезаны пластинки размером 20×20 мм², толщиной около 2 мм и прошлифованы до толщин 1,4–1,5 мм. Пластинки та-

кой же площади вырезаны из листа стали толщиной 1 мм. Затем все пластинки прокатаны при комнатной температуре во взаимно перпендикулярных направлениях с обеспечением последовательного ряда степеней пластической деформации. Образцы представляли собой стопки пластинок заданного слоя с одинаковой ϵ , которая определена нами как изменение (в процентах) толщины каждой пластинки после прокатки относительно начальной. Высота стопок составляла 3–5 мм, что исключало, согласно [2] и проведенным на изготовленных для данной работы пластинках исследованиям, влияние на результаты измерений толщины образцов.

На рисунке 1 приведены зависимости амплитуд вносимой ЭДС (в условных единицах) от степени деформации указанных образцов.

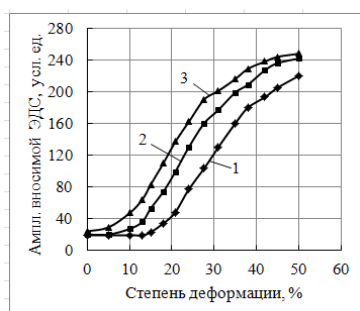


Рисунок 1 – Зависимости амплитуд вносимой ЭДС от степени деформации образцов из стального листа толщиной 1 мм (1), наружных (2) и внутренних (3) слоев листа толщиной 10 мм

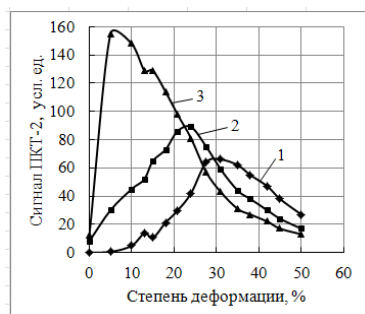


Рисунок 2 – Зависимости сигналов прибора ПКТ-2 от степени деформации образцов из стального листа толщиной 1 мм (1), наружных (2) и внутренних (3) слоев листа толщиной 10 мм

Из рисунка 1 следует, что по мере роста степени деформации вихретоковый сигнал увеличивается. Амплитуда E зависит от начальной магнитной восприимчивости χ_{in} исследуемого образца. Рост E с увеличением ϵ объясняется возрастанием χ_{in} за счет роста содержания в образцах ферромагнитной α -фазы [4]. Снижение чувствительности E к изменениям ϵ в конце ее диапазона объясняется уменьшением χ_{in} с возрастанием плотности дислокаций [5]. Указанные процессы более значимо выражены во внутренних слоях толстого стального листа в силу их «смягченной» исходной закалки,

наиболее медленно они протекают в интенсивно закаленном тонком листе.

На рисунке 2 представлена зависимость сигналов прибора ПКТ-2 от степени деформации изготовленных нами образцов.

Измеряемая прибором ПКТ-2 амплитуда третьей гармонической составляющей E_3 для всех трех кривых демонстрирует на начальном участке шкалы деформаций рост, связанный с увеличением процентного содержания ферромагнитного мартенсита деформации. Такой ход зависимостей вытекает из прямой пропорциональности E_3 коэффициенту Релея, который является характеристикой ферромагнитного материала. Переход к уменьшению сигнала ПКТ-2 при превышении определенного порога степени деформации с формированием на каждой кривой максимума большей или меньшей крутизны объясняется уменьшением коэффициента Релея из-за увеличения в образце плотности дислокаций [5]. Наиболее активно эти процессы протекают во внутренних слоях толстолистовой стали, с повышением интенсивности закалки они замедляются.

Таким образом, по измерениям амплитуды вносимой ЭДС накладного вихретокового преобразователя возможен контроль в широком диапазоне степеней деформации образцов из стали 12X18H10T, однако следует учитывать, что структуры, расположенные внутри изделий, могут иметь электромагнитные характеристики, отличные от наружных. Использование измерений амплитуды третьей гармонической составляющей выходной ЭДС для контроля степеней деформации возможно лишь в ограниченном их интервале ввиду неоднозначной зависимости E_3 от ϵ . При этом также должны учитываться условия исходной закалки стали.

Литература

1. Шарандо, В.И. Использование магнитодинамического и электромагнитного методов контроля при изучении процессов деформации стали 12X18H10T / В.И. Шарандо, А.В. Чернышев, Н.В. Кременькова // «Приборостроение – 2020»: материалы 13-й Международной научно-технической конференции, Минск 18–20 ноября 2020 г. – Минск, 2020. – С. 173–175.
2. Чернышев, А.В. Влияние толщины изделий при изучении процессов деформации стали 12X18H10T с помощью электромагнитного контроля / А.В. Чернышев, В.И. Шарандо, Н.В. Кременькова // «Приборостроение – 2021»: материалы 14-й Международной научно-технической конференции, Минск 17–19 ноября 2021 г. / БНТУ, редкол.: О.К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 365–366.
3. Гусак, Н.О. Прибор для контроля твердости ПКТ-2 / Н.О. Гусак, А.В. Чернышев, В.Л. Цукерман // Дефектоскопия. – 1991. – № 10. – С. 92.
4. Влияние деформации прокаткой и одноосным растяжением на структуру, магнитные и механические свойства армо-железа, стали 12X18H10T и составного материала «сталь 12X18H10T – армо-железо – сталь 12X18H10T» / Э.С. Горкунов [и др.] // Дефектоскопия. – 2011. – № 6. – С. 16–30.

УДК 621.793.18

ИОННО-ПУЧКОВЫЙ СИНТЕЗ ПРОЗРАЧНЫХ МЕДНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

Телеш Е.В., Гутенко Н.Д., Данилович С.В.

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

Аннотация. Исследовано влияние температуры подложки на характеристики прозрачных медных электродов, полученных прямым осаждением из ионных пучков. Установлено, что сопротивление снизилось почти в 2 раза при $T_n \sim 500$ К. Это связано с ростом размеров зерен меди, что подтверждено исследованием микроструктуры пленок. Нагрев подложки способствовал отжигу дефектов, неоднородностей, десорбции примесей, что привело к улучшению оптических параметров покрытий. Оптимальная температура подложки для формирования прозрачных медных электродов с высокой прозрачностью и низким сопротивлением должна составлять 520–540 К.

Ключевые слова: ионный пучок, медные электроды, оптическое пропускание, температура подложки.

ION BEAM SYNTHESIS OF TRANSPARENT COPPER ELECTRODES

Telesh E.V., Gutenko N.D., Danilovich S.V.

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

Abstract. The effect of substrate temperature on the characteristics of transparent copper electrodes obtained by direct deposition from ion beams was studied. It was found that the resistivity decreased by almost 2 times at $T_s \sim 500$ K. This is due to an increase in the size of copper grains, which was confirmed by studying the microstructure of the films. Heating the substrate contributed to the annealing of defects, inhomogeneities, and desorption of impurities, which led to an improvement in the optical parameters of the coatings. The optimal substrate temperature for the formation of transparent copper electrodes with high transparency and low resistance should be 520–540 K.

Key words: ion beam, copper electrodes, optical transmission, substrate temperature

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

Прозрачные электроды с использованием оксида индия (ITO) давно и широко используются в промышленности и занимают 95 % рынка прозрачных проводящих покрытий. ITO обладает высокой проводимостью и прозрачностью, однако склонен к растрескиванию, а потому неприменим для создания гибких дисплеев. В последнее время в технологии отмечается тенденция использования полупрозрачных слоев металла (серебро, медь). Медные пленки находят применение в качестве полупрозрачных электродов в гибких ЖК дисплеях [1], органических светодиодах [2], сенсорных экранах [3].

Для нанесения медных пленок в основном применяют магнетронное распыление, химическое и электрохимическое осаждение. Недостатки этих методов связаны с низкой энергией (< 2–5 эВ) осаждаемых частиц, что не позволяет обеспечить высокие адгезию и плотность пленок при низких температурах подложки. Осаждение металлических пленок непосредственно из пучков ионов дает возможность управления энергией осаждаемых ионов, позволяет изменять адгезию пленок к подложке, структуру и состав растущей пленки, а, следовательно, и ее свойства. Авторами ранее был применен новый метод для нанесения тонких медных пленок, исследовано влияние параметров ионного пучка на электрофизические характеристики пленок [4].

Задачей настоящей работы является исследование влияния температуры подложки на характеристики прозрачных медных электродов.

Покрытия наносили на подложки из стекла с использованием ускорителя с анодным слоем, работающего в режиме ионно-пучкового фокуса. Исследовано влияние температуры подложки на удельное объемное сопротивление ρ_v пленок меди. Установлено, что ρ_v снизилось почти в 2 раза при $T_n \sim 500$ К (рисунок 1).

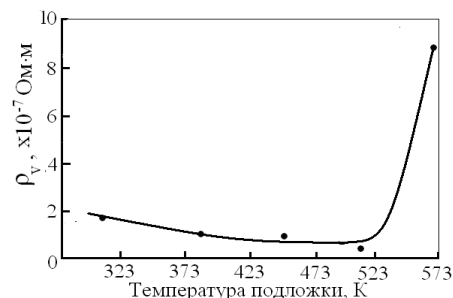


Рисунок 1 – Зависимость удельного объемного сопротивления пленок меди от температуры подложки

Это связано с ростом размеров зерен меди и, соответственно, уменьшением рассеяния электронов на границах зерен. Однако дальнейшее повышение T_n привело к резкому росту ρ_v в 9–10 раз. Это объясняется усилением химического взаимодействия атомов меди с газами остаточной

атмосферы в вакуумной камере и появлением диэлектрической прослойки на границах зерен.

Структура пленок исследовалась методом рентгеноструктурного анализа с помощью дифрактометра *Rigaku Ultima IV*. У пленок, сформированных при $T_{\text{п}} = 510$ К, наблюдалось увеличение интенсивности отражения от основной плоскости (111) (рисунок 2). Также появились небольшие пики отражения плоскостей (220) и (311), которые отсутствовали у пленок, полученных при низких температурах подложки.

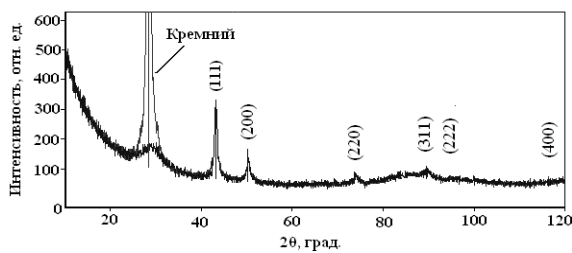


Рисунок 2 – Рентгенограмма пленки меди

АСМ изображение морфологии поверхности пленки, полученной при $T_{\text{п}} = 510$ К, также свидетельствовало о ее крупнозеренной структуре (рисунок 3).

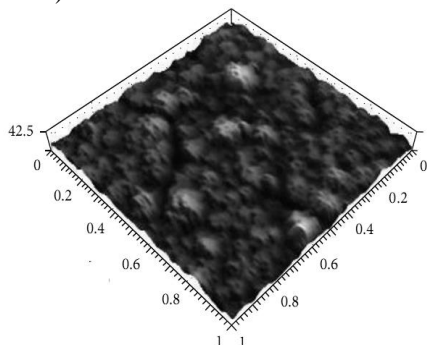


Рисунок 3 – АСМ изображение морфологии поверхности медной пленки

Измерение оптических параметров покрытий осуществлялось в диапазоне 300–900 нм с помощью спектрофотометра *MC-121 PROSCAN*.

Нагрев подложки до 520 К привел к снижению пропускания в инфракрасной области спектра (рисунок 4). Зависимость оптических параметров на длине волны 555 нм показала, пропускание снизилось на 5–7 % при нагреве подложки от 373 до 423 К. Это можно связать с увеличением степени химического взаимодействия атомов меди с газами остаточной атмосферы (рисунок 5).

Дальнейший нагрев подложки способствовал отжигу дефектов, неоднородностей, десорбции примесей, что привело к улучшению оптических

параметров покрытий. При $T_{\text{п}} = 573$ К произошло существенное снижение пропускания и рост поглощения, что связано с процессом кристаллизации пленки меди, ростом зерен.

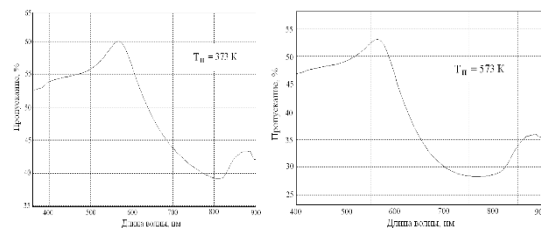


Рисунок 4 – Спектральные зависимости пропускания медных покрытий

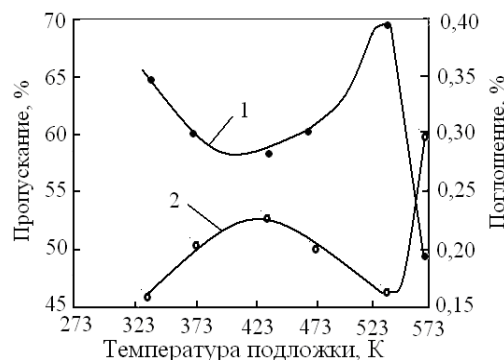


Рисунок 5 – Зависимость оптического пропускания (1) и поглощения (2) на $\lambda = 555$ нм пленок меди от температуры подложки

Таким образом, оптимальная температура подложки для формирования прозрачных медных электродов с высокой прозрачностью и низким сопротивлением должна составлять 520–540 К.

Литература

1. Properties of ITO/Cu/ITO multilayer films for application as low resistance transparent electrodes / D.-J. Kim [et.al.] // *Trans. on electrical and electronic materials*. – 2009. – V. 10, № 5. – P. 185–186.
2. Kang, M.-G. Semitransparent Cu electrode on a flexible substrate and its application in organic light emitting diodes / M.-G. Kang, L.G. Guo // *J. of Vac. Sci. and Technol. B*. – 2007. – V. 25, № 6. – P. 2637–2641.
3. Indium-free, highly transparent, flexible Cu₂O/Cu/Cu₂O mesh electrodes for flexible touch screen panels / D.-J. Kim [et al.] // *Sci. Rep.* – 2012. – V. 5, 16838.
4. Телеш, Е.В. Электрофизические характеристики наноразмерных пленок меди, полученных прямым осаждением из ионных пучков / Е.В. Телеш, Н.Д. Гутенко // *Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. X Междунар. науч. конф., Минск, 12–14 окт. 2022 г. / редкол.: В.Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2022. – С. 540–544.*

УДК 621.793.18

ФОРМИРОВАНИЕ ФТОРУГЛЕРОДНЫХ ЗАЩИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Телеш Е.В., Шевчик Е.В., Потылкин А.Н.

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

Аннотация. Исследовано влияние технологических режимов на свойства фторуглеродных защитных оптических покрытий, полученных ионно-лучевым распылением составной мишени из политетрафторэтилена и графита. В результате проведенных исследований определены оптимальные условия для формирования покрытий с оптической прозрачностью до 96 %, микротвердостью до 484 НК, низким коэффициентом трения, углом смачивания до 107 градусов и высокой адгезией к стеклу.

Ключевые слова: фторуглеродные покрытия, защитные оптические покрытия, составная мишень, ионно-лучевое распыление.

FORMATION OF FLUOROCARBON PROTECTIVE OPTICAL COATINGS

Telesh E.V., Shevchik E.V., Potylkin A.N.

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

Abstract. The influence of technological regimes on the properties of fluorocarbon protective optical coatings obtained by ion-beam sputtering of a composite target of polytetrafluoroethylene and graphite has been studied. As a result of the research, optimal conditions were determined for the formation of coatings with optical transparency up to 96 %, micro-hardness up to 484 НК, low coefficient of friction, contact angle up to 107 degrees and high adhesion to glass.

Key words: fluorocarbon coatings, protective optical coatings, composite target, ion-beam sputtering, protective optical coatings.

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

Одним из наиболее перспективных материалов, обладающим уникальным комплексом физико-химических свойств, являются фторуглероды. К их основным достоинствам относятся высокие диэлектрические характеристики, химическая инертность, низкий коэффициент трения, гидрофобность [1].

Загрязнение поверхности защитного стекла или колпака, расположенных перед объективом камеры наблюдения, со временем может существенно ухудшить качество изображения. Защита от загрязнения и воды актуальна для любых других оптически прозрачных поверхностей, в том числе не имеющих прямого отношения к видеонаблюдению. Поэтому весьма перспективно применение фторуглеродных пленок в качестве оптических защитных покрытий. Такие покрытия должны быть прозрачны в видимом диапазоне, иметь большой угол смачивания, обладать приемлемыми твердостью износостойкостью и адгезией к стеклу.

Для получения покрытий широко используется распыление полимерных мишеней из политетрафторэтилена. Однако процесс распыления носит нестационарный характер, что не позволяет воспроизводимо получать покрытия с заданными характеристиками [2]. Поэтому было предложено использовать распыление составной мишени из графита и политетрафторэтилена [3].

Для компенсации положительного заряда на мишени 2 применялся термокатод 3 из вольфрама

(рисунок 1). Ток через термокатод составлял 14 А. Ионный источник 1 представлял собой ускоритель с анодным слоем. В качестве подложки 4 использовалось оптическое стекло К8.

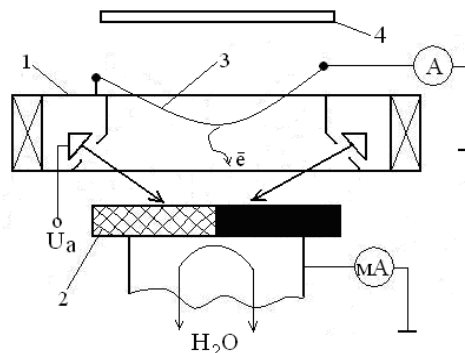


Рисунок 1 – Схема ионно-лучевого распыления составной мишени

Задачей данных исследований было исследование влияния технологических факторов на характеристики фторуглеродных защитных оптических покрытий. В процессе нанесения варьировались состав рабочей газовой среды, ускоряющее напряжение на аноде U_a и температура подложек T_n . В качестве рабочих газов применялись аргон и хладон-218 (C_3F_8).

Измерение пропускания покрытий осуществлялось в диапазоне 350–900 нм с помощью спектрофотометра PROSCAN. Установлено, что

покрытия обладали высокой прозрачностью (свыше 95 %) в видимом и ближнем ИК диапазоне длин волн (рисунок 2).

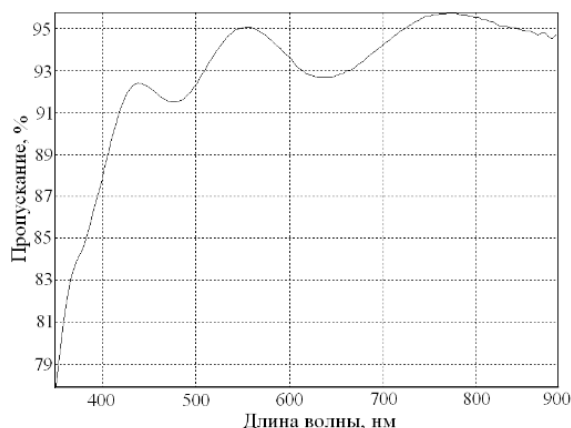


Рисунок 2 – Спектральная зависимость пропускания фторуглеродных покрытий

Установлено, что при давлении хладона более $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па происходит снижение оптического пропускания с 96 до 92 %.

Угол смачивания покрытий дистиллированной водой измерялся с применением гониометра ЛК-1. Результаты приведены в таблице 1. Анализ данных таблицы показывает, что нагрев подложки способствовал увеличению угла смачивания.

Таблица 1. Исследования влияния режимов нанесения на угол смачивания

Давление аргона, Па	Давление хладона, Па	U_a , кВ	I_m , мА	T_p , К	Угол Смачив., град.
$5,2 \cdot 10^{-2}$	–	1,0	20	343	102
$5,2 \cdot 10^{-2}$	–	1,0	20	438	105
$5,0 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	1,2	25	343	98
$5,1 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	1,2	20	343	104
$5,2 \cdot 10^{-2}$	–	1,6	27	373	107
$5,2 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	1,3	26	343	101
$5,2 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-2}$	1,4	30	343	107

Важными эксплуатационными параметрами оптических покрытий являются их микротвердость и износостойкость. Микротвердость измерялась по шкале Кнуппа с использованием твердомера *VMHT* MOT фирмы *Leica*. Нагрузка составляла 10 Н. Трибологические характеристики измерялись с использованием микротвердомера МТ-4. Нагрузка в условиях сухого трения составляла 0,5 Н. На рисунке 3 приведена трибограмма фторуглеродного покрытия.

Установлено, что повышение температуры подложки повышало значения микротвердости и коэффициента трения. В таблице 2 представлены результаты измерений механических характеристик.

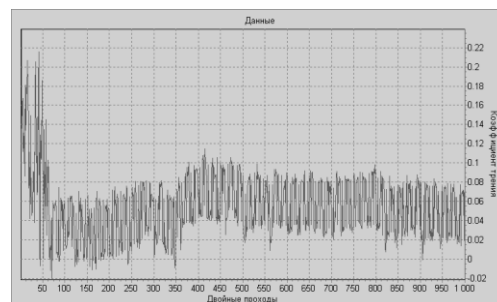


Рисунок 3 – Трибограмма фторуглеродного покрытия

Таблица 2. Исследования влияния режимов нанесения на механические характеристики покрытий

Давление аргона, Па	Давление хладона, Па	U_a , кВ	T_p , К	Микротвердость, НК	Коэффициент трения
$5,2 \cdot 10^{-2}$	–	1,0	343	180	–
$5,2 \cdot 10^{-2}$	–	1,0	438	278	0,10–0,36
$5,0 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	1,2	343	162	–
$5,1 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	1,2	343	146	0,14–0,26
$5,2 \cdot 10^{-2}$	–	1,6	373	330	–
$5,2 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	1,3	343	313	0,10–0,22
$5,2 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-2}$	1,4	343	484	–

Адгезия, измеренная с использованием метода насечек, составила 4–5 В по шкале *ASTM*, что свидетельствует о формировании прочных адгезионных связей между покрытием и стеклом.

Таким образом, ионно-лучевое распыление составной мишени позволило получить качественные прозрачные гидрофобные защитные оптические покрытия на стекле.

Литература

1. Super-hydrophobic coatings prepared by RF magnetron sputtering of PTFE / M. Drabik [et al.] // *Plasma Processes Polym.* – 2010. – V. 7. – P. 544–551.
2. Телеш, Е.В. Ионно-лучевое распыление мишени из политетрафторэтилена / Е.В. Телеш, В.А. Точный // *Приборостроение – 2021: материалы 14-й Междун. научно-технической конференции.* – 2021. – С. 355–356.
3. 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.

УДК 53.087.51

РАСПОЗНАВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА В УСЛОВИЯХ МАЛЫХ ПОТОКОВ ФОТОНОВ

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

*Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Предложен метод реконструкции изображения, полученного в условиях малых потоков фотонов. Алгоритм распознавания основан на статистическом анализе распределения активных пикселей детектора в сравнении с равномерным распределением плотности пикселей при равномерной освещенности детектора.

Ключевые слова: распознавание изображений, малые потоки фотонов.

IDENTIFICATION OF THE OBJECT IN AN IMAGE OF SMALL PHOTON FLUXES

Trapenok N.V., Balukho I.N., Dudchik Y.I., Kolchevsky N.N.

*Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Proposed method of reconstruction of the image obtained under conditions of small photon fluxes. The recognition algorithm is based on statistical analysis of the distribution of active pixels of the detector in comparison with the uniform distribution of pixel density at uniform illumination of the detector.

Key words: image identification, small photon fluxes.

Адрес для переписки: Кольчевский Н.Н., ул. Курчатова 1-62, г. Минск, 220045, Республика Беларусь
e-mail: kolchevsky@bsu.by

В связи с малыми размерами объектов, трудности источников высокой интенсивности рентгеновского диапазона в экспериментах используется малое число фотонов. Малым числом фотонов будем считать число, при котором визуальная оценка экспериментального изображения не дает результатов. Но после графической обработки такая возможность может появиться, на рисунках 1–2 показана графическая обработка методом Гаусса.

Следует отметить, что простая обработка методом Гаусса в основном повышала эффективность алгоритмов распознавания объектов при малом числе фотонов.

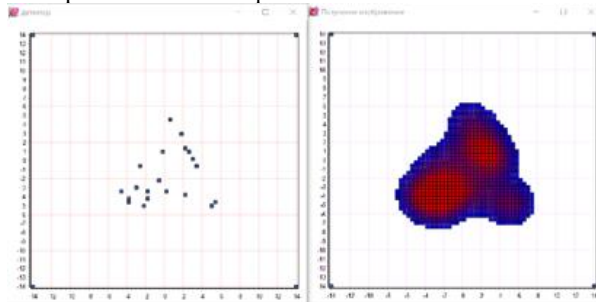


Рисунок 1 – Результат работы программы «SMI»: показаны распределение одиночных фотонов, координаты активных пикселей детектора и результат программы восстановления с использованием изображения треугольника при числе зарегистрированных фотонов равно $N = 20$

В условиях полного отсутствия возможности визуальной оценки изображения, и при условии, что число зарегистрированных фотонов не критически мало, между координатами активированных фотонов пикселей детектора, между координатами все

еще сохраняется закономерность, по которой разработанные алгоритмы способны распознать объект. По этой причине представляется возможность намеренно снижать радиационную нагрузку и время проведения эксперимента. Критическое минимальное число зарегистрированных фотонов постоянно варьируется и зависит напрямую от задачи эксперимента, имеющейся информации и используемого алгоритма распознавания.

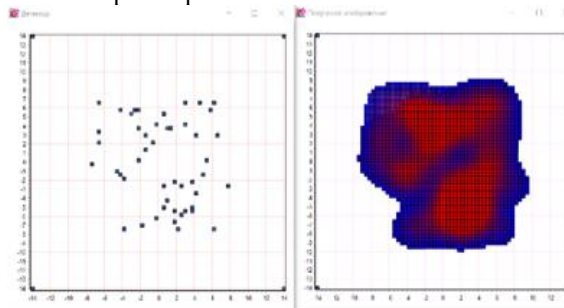


Рисунок 2 – Результат работы программы «SMI»: показаны распределение одиночных фотонов, координаты активных пикселей детектора и результат программы восстановления изображения квадрата при числе зарегистрированных фотонов равно $N = 50$

Зная параметры эксперимента, в первую очередь нужно удостовериться, что расположение попаданий на экспериментальном изображении не несет случайный характер.

В противном случае это будет означать отсутствие объекта или то, что число зарегистрированных фотонов слишком мало и не несет информации. Для этого нужно провести анализ отклонения экспериментального изображения от изображения полученном при равномерном освещении детектора (рисунки 3 и 4).

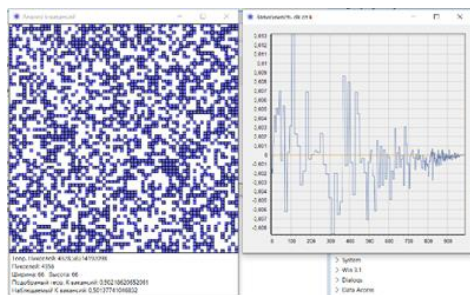


Рисунок 3 – Результат моделирования программы «SMI2». Слева показаны активные пиксели детектора, а справа зависимость отклонения от равномерного освещения

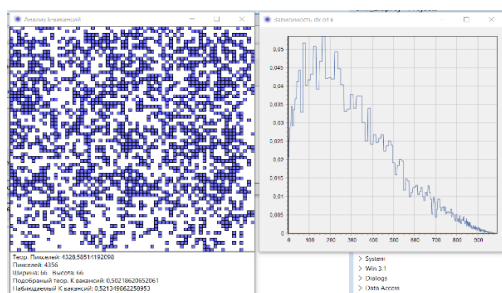


Рисунок 4 – Результат моделирования программы «SMI2». Слева показаны активные пиксели детектора, а справа зависимость отклонения от равномерного освещения

Заметим, что тяжело визуально определить наличие отклонения от равномерного освещения, но алгоритм прекрасно с этим справляется.

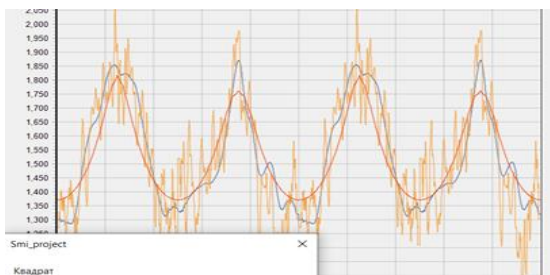


Рисунок 5 – График зависимости боковой плотности по 2π . Результат работы программы «SMI». Боковая плотность квадрата для восстановленного и не восстановленного изображения

После подтверждения наличия объекта на изображении стоит задача его распознавания. Зависимость отклонения от равномерного освещения является практически индивидуальной для каждого изображения, к которому оно относится, в следствии зависимости можно, применяя прямую для распознавания изображений объектов.

Для случая, если известна группа искомым объектов, разработан алгоритм, который распознает объект как один из заранее искомым образцов по наименьшему отклонению (рисунок 5).

При нужде распознавания периодических структур, таких как решетки (рисунок 6), применяются алгоритмы определения центров элементов периодической структуры (рисунок 7).

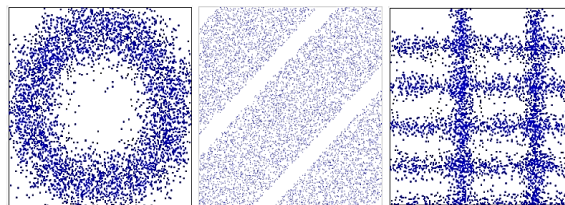


Рисунок 6 – Примеры некоторых возможных генераций изображений при помощи GSMI

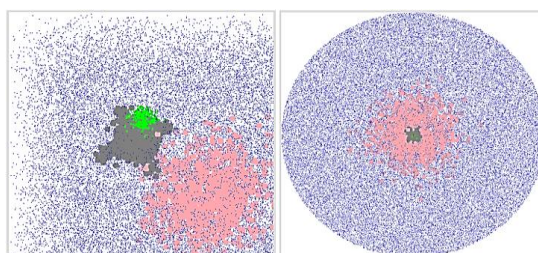


Рисунок 7 – Изображение с определенными центрами периодических элементов, разными методами для числа итераций $i = 1000$

Таким образом, при помощи разработанных алгоритмов, имеется возможность распознавания разных классов объектов, при малом числе зарегистрированных фотонов, исчисляемых сотнями, а в некоторых случаях и десятками.

Литература

1. MacDonald, K.A. X-ray Physics, Optics, and Applications / K.A. MacDonald // Princeton University Press. – 2017. – 367 с.
2. Ахманов, С.А. Введение в статистическую радиофизику и оптику / С.А. Ахманов, Ю.Е.Дьяков, А.С. Чиркин. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 640 с.
3. Рентгеновская оптика: современное состояние и области применения / Г.И. Грейсух. – 2014. – 87 с.
4. Получение изображений объектов в условиях слабых потоков фотонов / Н.В. Трапенко [и др.] // Компьютерные технологии и анализ данных (CTDA'2022) : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 21–22 апр.2022 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. В. Скаун (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2022. – С. 244–246.

УДК 338.23

ЦИФРОВОЕ РАЗВИТИЕ В ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ В СФЕРЕ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Третьякова Е.С.¹, Тришина С.Л.²

¹ Белорусский национальный технический университет

² Белорусский государственный экономический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассматривается развитие цифровой экономики в сфере промышленности и приборостроения с учетом реализации Государственной программы «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 годы. Развитие цифровой экономики стимулирует предприятия к реорганизации, формируя новые требования к структуре компаний. Представлены три основных подхода, на которых базируются определения цифровой трансформации.

Ключевые слова: цифровая экономика, цифровая трансформация экономики, приборостроение.

DIGITAL DEVELOPMENT IN THE ACTIVITIES OF ENTERPRISES IN THE FIELD OF INDUSTRY AND INSTRUMENT MAKING

Tretyakova E.S.¹, Trishina S.L.²

¹Belarusian National Technical University

²Belarusian State Economic University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article considers the development of digital economy in the sphere of industry and instrumentation with regard to the implementation of the State Program "Digital Development of Belarus" for 2021–2025. The development of the digital economy stimulates enterprises to reorganization, forming new requirements to the structure of companies. Three main approaches on which definitions of digital transformation are based are presented.

Key words: digital economy, digital transformation of the economy, instrumentation.

*Адрес для переписки: Третьякова Е.С., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: elena.tsk@gmail.com*

Электронная промышленность и приборостроение – наиболее наукоемкая и технологически сложная отрасль современного машиностроения. Развитие электронной промышленности играет значимую роль. В Программе социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы основной акцент делается на современные технологии – формирование развитой информационно-коммуникационной инфраструктуры (физической, гибридной и цифровой (виртуальной)). В новом пятилетии взят курс на внедрение информационно-коммуникационных и передовых производственных технологий во все сферы жизнедеятельности.

Инструментом выполнения поставленных задач является реализация Государственной программы «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 годы (основной практический инструмент внедрения передовых информационных технологий в отрасли национальной экономики и сферы жизнедеятельности общества в предстоящий период), иных государственных программ и программ социально-экономического развития административно-территориальных единиц, региональных комплексов мероприятий в части мероприятий в сфере информатизации.

Развитие цифровой экономики стимулирует предприятия к реорганизации и создает структурный спрос на рабочие места, формируя новые требования к структуре компаний.

Цифровая трансформация экономики предполагает организацию цифровой информационной среды путем формирования нормативной правовой базы и внедрения действенных инструментов управления процессами цифровизации экономики.

Термины «цифровая экономика» и «цифровая трансформация экономики» все чаще применяются исследователями, представителями мирового бизнес-сообщества, политиками, журналистами, однако содержания этих понятий не изучены в полной мере, поскольку с каждым днем они наполняются новыми элементами.

Сущность цифровой трансформации и механизмы ее осуществления рассматриваются в работах отечественных авторов, таких как Г.Н. Андреева, Т.А. Гилева, Ю.И. Грибанов, В.С. Овчинский и др. Среди зарубежных авторов, которые рассматривали проблематику цифровой трансформации, можно выделить Bob Eustace, Caglayan Arkan, Fredrik Ostbye, Michael Wade, Г. Шу, Р. Андерла, Дж. Паркер, М. Альстин, Т. Салдан, М. Уэйд, Д. Лаукс [1].

По мнению автора И. В. Балахоновой, монография «Оценка цифровой зрелости как первый шаг цифровой трансформации процессов промышленного предприятия», в настоящее время нет однозначной трактовки термина «цифровая трансформация». Определение данного термина отражает основные подходы к переходу промышленных предприятий на шестой технологический

уклад (иными словами, в цифровую эпоху). В эпоху цифровизации (шестой технологический уклад) меняются представления о конкурентных преимуществах предприятий, особенно в сфере «высоких технологий» (электронной отрасли): происходит переход от моделей, основанных на эффективности производственных факторов и специализации, к моделям, основанным на знаниях и компетенциях [1].

Автор данной работы соглашается с Юрием Грибановым, в том, что все определения цифровой трансформации базируются на трех основных подходах:

1. Технологический подход к цифровой трансформации промышленных предприятий, который заключается в выборе динамического пула технологий, способствующих ускоренной цифровизации и цифровой трансформации процессов производственной системы предприятия.

2. Процессный подход, в рамках которого промышленное предприятие рассматривается как совокупность цепочек создания ценности от разработки продукции до ее реализации и сервисного обслуживания, при этом любая деятельность на предприятии рассматривается через призму формирования добавочной стоимости, а цифровизация позволяет купировать на предприятии деятельность, не приносящую добавленную стоимость.

3. Отраслевой подход, который выдвигает необходимость изучения тесной взаимосвязи различных уровней управления на предприятии с учетом отраслевой специфики и рынков готовой продукции и услуг, на которых действует предприятие, или потенциально может выйти на данные рынки.

Цифровая трансформация промышленных предприятий отражает, главным образом, цифровую трансформацию конструкторско-технологической подготовки производства и собственного процесса производства инновационных продуктов [1; 2].

Особую важность приобретают три технологии – это искусственный интеллект, 3D-печать в промышленных масштабах, современные робототехнические системы.

Согласно отчету российского исследовательского бюро *KMDA*, в разрезе понятий цифровой трансформации необходимо рассмотреть такой термин, как «цифровая зрелость», поскольку он отражает реальную оценку деятельности предприятия в сфере внедрения инновационных инструментов и механизмов решения управленческих задач, повышения

компетенции сотрудников [3]. В мировой практике первые методы оценки цифровой зрелости появились в начале 2010-х годов [4].

Цифровая зрелость или digital-зрелость – это показатель цифрового развития. У компании высокий уровень цифровой зрелости, когда она использует современные цифровые технологии для производства, коммуникаций с клиентами, организации продаж, продвижения, управления внутренними процессами в сфере промышленности и приборостроения.

Цифровая зрелость складывается из внутренних и внешних процессов.

Наиболее важным разделом отчета цифровой трансформации процессов промышленного предприятия является оценка затрат, которые должно понести предприятие в течение 1–2 лет на цифровую трансформацию.

Обязательным разделом отчета цифровой трансформации процессов промышленного предприятия является расчет экономического эффекта цифровой трансформации процессов промышленного предприятия [1].

Цифровая трансформация экономики позволяет создавать новые возможности для развития и модернизации всех бизнес-процессов. Развитие электронной (цифровой) промышленности на основе использования электронных компонентов обеспечит современный подход в важнейших областях информатизации, телекоммуникации и связи.

Промышленные предприятия смогут выйти на мировой уровень как с точки зрения выпускаемой продукции, так и с точки зрения новой организации производства на базе цифровых технологий в сфере промышленности и приборостроения, в том числе реализовать Государственную программу «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 годы.

Литература

1. Балахонова, И.В. Оценка цифровой зрелости как первый шаг цифровой трансформации процессов промышленного предприятия : монография / И.В. Балахонова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2021. – 276 с
2. Грибанов, Ю.И. Цифровая трансформация социальноэкономических систем на основе развития сервисной организации : дисс. на соискание ученой степени доктора экономических наук. – СПб., 2019. – 355 с.
3. Блеск и нищета отечественной цифровизации: разбор аналитического отчета *KMDA* 2020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bigdataschool.ru/blog/kmda-report-digitalization.html>.
4. Мерзлов И.Ю. Методы оценки цифровой зрелости: обзор международной практики / И.Ю. Мерзлов // Креативная Креативная экономика. – 2022. – Т. 16, № 2. – С. 503–520.

УДК 67.02:004.9

3D-ПЕЧАТЬ В ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ОРГАНОВ

Храмкова А.С., Монич С.Г.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В этой статье рассматривается применение технологий 3D-печати и 3D-биопечати для изготовления функциональных медицинских фантомов и биоструктур, современное состояние, а также новые разработки и тенденции в области 3D-печатных функциональных медицинских фантомов (т. е. медицинских фантомов, имитирующих ткани, радиологически релевантных медицинских фантомов и физиологических медицинских фантомов) и 3D-биопечатных структур (т. е. гибридных каркасные материалы, трансформируемые каркасы и интегрированные датчики) для регенерированных тканей и органов.

Ключевые слова: 3D-печать, 3D-биопечать, фантом, искусственный орган.

3D-PRINTING IN THE TECHNOLOGY OF CREATING ARTIFICIAL ORGANS

Khramkova A., Monich S.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. This article reviews the application of 3D printing and 3D bioprinting technologies for the fabrication of functional medical phantoms and biostructures, the state of the art, and new developments and trends in the field of 3D printed functional medical phantoms (i. e., medical phantoms, tissue mimics, radiologically relevant medical phantoms, and physiologic medical phantoms) and 3D bioprinted structures (i. e., hybrid scaffolds, transformable scaffolds, and integrated sensors) for regenerated tissues and organs.

Key words: 3D printing, 3D bioprinting, phantom, artificial organ.

*Адрес для переписки: Храмкова А.С., ул. Балтийская, 4, г. Минск, 220028, Республика Беларусь
e-mail: alinahramkova.com@gmail.com*

Медицинские модели, или «фантомы», широко используются для медицинского обучения и взаимодействия врача и пациента. Они все чаще используются для хирургического планирования, медицинских вычислительных моделей, проверки и проверки алгоритмов, а также разработки медицинского оборудования.

Вследствие быстрого развития технологий трехмерной (3D) печати и 3D-биопечати многие исследователи изучили возможность использования этих методов аддитивного производства для изготовления функциональных медицинских фантомов для различных применений (рисунок 1).

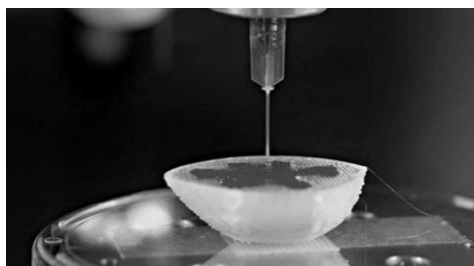


Рисунок 1 – Процесс 3D-печати

Физические медицинские фантомы в основном производятся с помощью традиционных производственных процессов, таких как литье и формование. Такие процессы изготовления включают в себя трудоемкие и зачастую дорогостоящие этапы подготовки оснастки. Кроме того, изготовление индивидуальных медицинских фантомов для конкретного пациента нерентабельно из-за

высокой стоимости инструментов. Таким образом, большинство этих фантомов представляют собой массово производимые, усредненные по численности населения, идеализированные модели для общего планирования и образовательных целей.

Последние достижения в области компьютерного проектирования (CAD), медицинской визуализации и технологий 3D-печати обеспечили быстрый и экономичный метод создания индивидуальных медицинских фантомов, имитирующих ткани пациента, на основе компьютерных моделей, реконструированных по результатам КТ или МРТ. Эти фантомы, ориентированные на конкретного пациента, обладают беспрецедентными преимуществами во многих биомедицинских приложениях, таких как проверка вычислительных моделей, тестирование медицинского оборудования, планирование хирургических операций, медицинское образование и взаимодействие врача и пациента [1].

В связи с растущим спросом на трансплантацию тканей и органов, а также дефицитом доноров тканей и органов, были предприняты многочисленные усилия по разработке биологических заменителей нативных тканей и органов человека. Можно использовать биоразлагаемые каркасы с высокой пористостью и взаимосвязью, чтобы обеспечить форму, механическую поддержку и микроархитектуру для клеточного роста и реорганизации, чтобы улучшить и ускорить процесс заживления и восстановления. В этом отношении

конструкция каркасов играет доминирующую роль в успешности лечения. Были предложены и исследованы различные стратегии создания 3D-каркасов, такие как сушка вымораживанием, газовое вспенивание, фазовое разделение, порообразное выщелачивание и электроформование. Однако точный контроль пористости и внутренней микроструктуры каркаса, изготовленного этими способами, с целью манипулирования кислородом, питательными веществами и растворимыми биомолекулами для стимулирования роста и дифференцировки клеток по-прежнему остается сложной задачей. Кроме того, основным препятствием инженерного проектирования является управление различными типами роста клеток каркаса с целью формирования функциональных тканей.

Хотя известно о нескольких впечатляющих клинических результатах по нагруженным аутологичными клетками каркасам с несложной структурной конструкцией, способным направлять регенерацию многофункциональных тканей и органов, передовые стратегии производства бесклеточных или клеточных нагруженные биокаркасы более высокого уровня сложности все еще разрабатываются. Достижения в методах АМ стали недавним прорывом в регенеративной медицине. Растущий интерес сосредоточен на производстве сложных и функциональных трехмерных биокаркасов из конкретных биоматериалов и клеток, чтобы обеспечить сходство микросреды и биологических компонентов с нативной тканью для применения ТЕ.

На сегодняшний день в литературе описано несколько типов систем биопечати, способных строить как бесклеточные, так и клеточные гидрогелевые каркасы. Три наиболее важных и хорошо зарекомендовавших себя метода биопечати – это прямой лазерный перенос (LIFT), струйная биопечать и роботизированное дозирование.

Большое количество исследований было сосредоточено на разработке роботизированной системы дозирования для биопечати (т. е. биопечати на основе экструзии, или *EVB*) благодаря ее простоте в использовании и хорошей совместимости с различными биочернилами. *EVB* позволяет изготавливать трехмерные конструкции в миллиметровом масштабе путем пневматического или механического дозирования биополимеров или синтетических биополимеров послойно. Миниткани (т. е. сфериды и органоиды), состоящие из нескольких типов клеток, могут служить строительными блоками для крупных тканей и органов, которые печатаются с использованием *EVB*. Однако необходимо устранить несколько технических пробелов, чтобы улучшить структурную и компонентную свободу этих 3D-конструкций.

Основное ограничение заключается в том, что для каждого процесса печати можно использовать только одну биочернилку; это повышает сложность построения 3D-архитектур высокого уровня сложности. Увеличение количества резервуаров в принтере может быть сделано для печати с использованием нескольких биочернил.

LIFT – это метод, позволяющий переносить клетки на принимающую подложку. Обычно импульсный лазерный луч наносится на донорское предметное стекло или ленту, содержащую исходные чернила (т. е. гидрогели и клетки), с последующим испарением чернил; это приводит к выбросу пузырьков под высоким давлением в сторону принимающей подложки, которая помещается под предметное стекло донора. Управляя движением донорского предметного стекла или подложки, можно построить нанесенный 2D-паттерн для формирования 3D-конструкции при послойном слиянии.

Гетерогенные конструкции с несколькими типами клеток также можно создавать с помощью струйной печати. В отличие от распространенного метода струйной биопечати, при котором чернила обычно наносятся на твердые подложки для получения трехмерной конструкции, клетки объединялись с хлоридом кальция (CaCl_2) для образования биочернил и чернил, которые в альгинатно-коллагеновый раствор. Часть поверхности раствора полимера, на которую попадали капли чернил, мгновенно затвердела за счет образования яйцеобразной структуры комплексов Ca_2^+ -альгинат. В отличие от метода *LIFT*, основным недостатком струйной биопечати является то, что жизнеспособность напечатанных клеток может быть значительно снижена из-за критического напряжения сдвига, которое возникает, когда биочернила проходят через сопло и осаждаются на подложке. Кроме того, в результате агрегации клеток во время печати происходит седиментация клеток, что приводит к засорению сопел и неоднородному распределению клеток в конструкциях [2].

Хотя оба метода обладают способностью точно создавать 3D-конструкции, состоящие из нескольких типов клеток, по требованию, эти стратегии печати обычно создают мелкомасштабные конструкции, что является препятствием для практического использования в клинических целях.

Литература

1. Shadab Hassan, The Feasibility of 3D Bioprinting [Electronic resource]. – Mode of access: <https://medium.com/@shadabhassan/the-feasibility-of-3d-bioprinting-2bc1d434222f>. – Date of access: 26.09.2023.
2. 3D Printed Organs – USC Viterbi School of Engineering [Electronic resource]. – Mode of access: <https://illuminate.usc.edu/3d-printed-organs>. – Date of access: 29.09.2023.

УДК 61:620.22-022.532

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ДЕНТАЛЬНОЙ ИМПЛАНТОЛОГИИ

Монич С.Г., Храмова А.С., Бондаренко В.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В данной работе было проведено исследование в области последних разработок, проблем и будущих направлений развития изготовления дентальных имплантов, которые обеспечат биологическую активность и терапевтическую эффективность модифицированных поверхностей имплантатов во время хирургической установки и сохранят свои свойства в процессе производства, хранения и лечения.

Ключевые слова: зубные имплантаты, титан, наноинженерия.

USE OF NANOTECHNOLOGY IN DENTAL IMPLANTOLOGY

Khramkova A., Bondarenko V., Monich S.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. In this work, a study was conducted in the field of recent developments, problems and future directions for the development of dental implant manufacturing, which will ensure the biological activity and therapeutic effectiveness of modified implant surfaces during surgical installation and retain their properties during production, storage and treatment.

Key words: dental implants, titanium, nanoengineering.

*Адрес для переписки: Храмова А.С., ул. Балтийская, 4, г. Минск, 220028, Республика Беларусь
e-mail: alinahramkova.com@gmail.com*

Многокомпонентная система зубных имплантатов (металлический винт, металлокерамический абатмент и керамическая коронка) взаимодействует с разными видами тканей и выполняет множество функций, что делает зубной имплантат одним из самых сложно имплантируемых устройств. Свойства поверхности дентального имплантата являются основным фактором, определяющим успех имплантации. Биологическая активность и терапевтическая эффективность модифицированных поверхностей имплантатов должны сохраняться в процессе производства, хранения и лечения. Однако для обеспечения желаемой эффективности таких новых систем имплантатов необходимы долгосрочные исследования.

Наноинженерия зубных имплантатов на основе титана развивается и набирает обороты, что связано с контролем над характеристиками имплантатов, достижением их успешной интеграции с тканями и местной терапией. По сравнению с другими клинически используемыми новыми стратегиями наноинженерии анодирование превосходит другие экономически эффективным и масштабируемым производством контролируемых биосовместимых наноструктур из титана, которые позволяют адаптировать топографию имплантата, химический состав, биологическую активность и терапию. Будущее зубных имплантатов стоит за микро- и наноинженерными имплантатами, которые смогут удовлетворить специфические терапевтические потребности пациентов: стабильность и долгосрочный успех без проведения обеззараживания, терапевтического

введения или коррекции, что сведет к минимуму посещения врача и дискомфорт пациента.

Типичные наноматериалы (диапазон размеров от 1 до 100 нм), используемые в стоматологии, включают нанокompозиты, наночастицы (или трубки/волокна), противомикробные вещества и нанопокрyтия.

Одной из целей наноинженерии зубных имплантатов является создание изотропных или анизотропных наноразмерных материалов, которые будут стимулировать биологическую активность клеток для усиления интеграции имплантата или обеспечения бактерицидных функций, с возможностью местной доставки лекарств для достижения этих функций или без нее. Поверхность наноразмерного имплантата может привести к измененному/усиленному физико-химическому (связывание костей или мягких тканей) или биохимическому (адгезия белков/клеток, поведение клеток) протеканию реакций.

Модификация поверхности зубных имплантатов проводится для достижения повышенной биологической активности и достижения долгосрочного эффекта терапии. Клинически используемые методы обработки поверхности имплантатов включают механическую обработку, пескоструйную обработку, кислотное травление, пескоструйную обработку и кислотное травление, анодирование и плазменную обработку.

Механическая обработка считается новаторской стратегией модификации зубных имплантатов, предполагающей использование более твердых металлов для деформации основного материала с высокими скоростями вращения, что

приводит к получению макро- и микромасштабных функций, которые эволюционировали от ручного управления к цифровому.

Далее пескоструйная очистка включает бомбардировку частицами Ti , Al , Al_2O_3 или гидроксипатита под воздействием высокоскоростного пескоструйного аппарата высокого давления, который создает микро/наноразмерные углубления на материале имплантата, характеристики которых определяются типом частиц и их размером.

Кислотное травление, изначально разработанное для устранения остатков при производстве имплантатов, позволяет изготавливать шероховатые (микро/нано) поверхности, но требует стандартизации для контроля топографии имплантата. Комбинация пескоструйной обработки и кислотного травления (*SLA* или пескоструйная обработка крупными зёрнами, травление кислотой) является клинически популярным выбором модификации имплантатов. Исследования сообщили об ускорении остеоинтеграции в течение 1–2 месяцев на поверхности микро/нано *SLA*-имплантатов.

Плазменная обработка включает модификацию имплантата желаемым материалом, покрытым посредством плавления и спекания, достигаемого посредством плазменной обработки в вакууме или среде низкого давления. Полученная поверхность имплантата покрывается слоями микро/наномасштаба, однако адгезивный слой может ломаться или расслаиваться, что потребует чрезвычайной осторожности во время установки имплантата.

Наноструктуры контролируемого титана (TiO_2), такие как нанотрубки и нанопоры, могут быть изготовлены на зубных имплантатах на основе Ti с использованием электрохимического анодирования (ЭА).

ЭА предполагает погружение целевой Ti -подложки (имплантата) в качестве анода и противоэлектрода (фиктивной Ti -подложки) в электролит с постоянным напряжением или током. Окисление Ti , вызванное электрическим полем, с образованием TiO_2 (диоксида титана) и индуцированное фторидом растворение TiO_2 внутри органического электролита, содержащего воду и фторид, при достижении электрохимического равновесия приводит к самоупорядочению нанотрубок/нанопор титана. Различные наноструктуры, такие как нанотрубки, нанопоры, нанотрава и наншаблоны с контролируемыми размерами, могут быть изготовлены путем настройки параметров ЭА, включая состав электролита (содержит воду и фтор), напряжение, ток, время и т. д. Примечательно, что зубные имплантаты существуют различных форм, размеров и геометрии и часто с микрошероховатостью, а оптимизированный ЭА может позволить создавать контролируе-

мые наноструктуры на их поверхностях. Параметры анодирования, включая возраст электролита, состав (содержит воду и фторид), напряжение анодирования, ток или время, можно оптимизировать для изготовления наноструктур на сложных поверхностях зубных имплантатов. Помимо Ti , зубные имплантаты на основе Zr также были наноинженерными с использованием анодирования для изготовления различных контролируемых нанотопографий.

Большинство попыток улучшить биологическую активность и терапевтические показатели Ti -имплантатов (как ортопедических, так и стоматологических) ограничивались использованием нанотрубок – полых структур, похожих на пробирки (открытые сверху и закрытые снизу).

Имплантаты из анодированного нанотрубчатого титана являются идеальной стратегией модификации поверхности зубных (и ортопедических) имплантатов. Примечательно, что, хотя большинство исследований предлагают нанотрубки титана в качестве модификации ортопедических имплантатов для интеграции с костной тканью, их применение оправдано и для зубных имплантатов с дополнительным требованием интеграции мягких тканей. Причинами, по которым анодирование и изготовление тротилов на титановых зубных имплантатах считаются идеальной стратегией поверхностной наноинженерии, являются:

- простота, масштабируемость и экономичность изготовления;
- возможность анодирования имплантатов сложной формы и геометрии;
- легкость настройки порядка, формы и размеров наноструктур;
- анодированный Ti демонстрирует повышенную биологическую активность и способность к местному высвобождению лекарств;
- микрошероховатость имплантатов можно сохранить для изготовления двойных микронаноструктур;
- многочисленные исследования *in vitro* и *in vivo* подтверждают биологическую активность и терапевтическую эффективность анодированных наноинженерных имплантатов.

Литература

1. CYBERLENINKA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektiva-ispolzovaniya-implantatov-iz-nanotitana-v-stomatologii>. – Дата доступа: 24.09.2023.
2. ScienceDirect [Electronic resource] Fit and forget: The future of dental implant therapy via nanotechnology. – Mode of access: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169409X23002156>. – Date of access: 24.09.2023.
3. Stomatologclub.ru [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://stomatologclub.ru/stati/implantologiya-14/nanotehnologii-v-implantacii-1200/>. – Дата доступа: 24.09.2023.

УДК 621.382

ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ДИАЗОХИНОННОВОЛАЧНОГО ФОТОРЕЗИСТА ФП9120, ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ СЕРЕБРА

Бринкевич Д.И.¹, Просолович В.С.¹, Черный В.В.², Вабищевич С.А.³, Вабищевич Н.В.³

¹Белорусский государственный университет

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

³Полоцкий государственный университет

Новополоцк, Республика Беларусь

Аннотация. Методом микроиндентирования исследованы пленки позитивного диазохинонноволачного фоторезиста ФП9120 толщиной 1,8 мкм, имплантированные ионами Ag⁺ с энергией 30 кэВ в интервале доз $2,5 \cdot 10^{16}$ – $1,0 \cdot 10^{17}$ см⁻² на имплантаторе ИЛУ-3. Сформированный при ионной имплантации Ag⁺ карбонизированный слой подавляет эффект восстановления отпечатка при индентировании. После длительного хранения (более 3 лет) пленка изменяет свои прочностные свойства и ведет себя как твердое (непластичное) тело, что обусловлено сшиванием молекул фенолформальдегидной смолы, снижающим подвижность молекул в условиях внешнего воздействия.

Ключевые слова: диазохинонноволачный фоторезист; имплантация; ионы серебра, микроиндентирование, восстановленная микротвердость.

STRENGTH PROPERTIES OF DIAZOQUINONENOVOLAC PHOTORESIST FP9120 FILMS IMPLANTED WITH SILVER IONS

Brinkevich D.I.¹, Prosolovich V.S.¹, Chernyi V.V.², Vabishchvich S.A.³, Vabishchvich N.V.³

¹Belarusian State University

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus³ Polotski State University

Novopolotsk, Republic of Belarus

Abstract. Films of positive diazoquinone novolac photoresist FP9120 with a thickness of 1.8 μm, were implanted by Ag⁺ ions with an energy of 30 keV in the dose range of $2.5 \cdot 10^{16}$ – $1.0 \cdot 10^{17}$ cm⁻² on an ILU-3 implanter were studied using the microindentation method. The carbonized layer formed during ion implantation of Ag⁺ suppresses the effect of indentation restoration. After long-term storage (more than 3 years), the film changes its strength properties and behaves like a solid (non-plastic) body, which is due to the cross-linking of phenol-formaldehyde resin molecules, which reduces the mobility of molecules under external influences.

Key words: diazoquinone-novolac photoresist; implantation; silver ions, microindentation, restored microhardness.

Адрес для переписки: Просолович В.С., пр. Независимости, 4, г. Минск, 22030, Республика Беларусь
e-mail: prosolovich@bsu.by

Позитивные диазохинонноволачные фоторезисты (ФР), представляющие собой композит фенол-формальдегидной смолы и светочувствительного агента (О-нафтохинондиазида), широко используются в современной микроэлектронике в качестве масок при ионной имплантации. При ионной имплантации полимерных фоторезистивных пленок на кремнии радиационно-индуцированные процессы приводят к существенным изменениям физико-химических свойств по всей толщине полимерных пленок [1; 2]. В последнее время был опубликован ряд работ [1; 3; 4] по исследованию радиационно-индуцированных процессов в фоторезистивных пленках, имплантированных ионами В⁺, Р⁺ и Sb⁺ на ионно-лучевом ускорителе барабанного типа «Везувий-б». Однако прочностные свойства имплантированных ионами Ag⁺ на имплантаторе ИЛУ-3 пленок позитивных диазохинонноволачных фоторезистов на

пластинах монокристаллического кремнии до настоящего времени не исследованы

Цель настоящей работы – исследование прочностных свойств имплантированных ионами Ag⁺ пленок диазохинонноволачного позитивного фоторезиста марки ФП9120.

Материалы и методы измерений. Пленки позитивных диазохинон-новолачных фоторезиста ФП9120 толщиной 1,8 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.

Имплантация ионами Ag⁺ с энергией 30 кэВ в интервале доз $\Phi = 2,5 \cdot 10^{16}$ – $1 \cdot 10^{17}$ см⁻² в режиме постоянного ионного тока (плотность тока

$j = 4 \text{ мкА/см}^2$) проводилась при комнатной температуре в остаточном вакууме не хуже 10^{-5} Па на имплантаторе ИЛУ-3. Во избежание перегрева и деструкции образца в процессе имплантации использовалась кассета, обеспечивающая эффективный сток ионного заряда с поверхности полимера и плотный контакт с металлическим основанием, охлаждаемым водой.

Микроиндентирование проводилось на приборе ПМТ-3 по стандартной методике. Нагрузка на индентор варьировалась в пределах 1–50 г. Длительность нагружения составляла 2 с; выдержка под нагрузкой 5 с. Погрешность измерений микротвердости составляла 2,5 %.

Эксперимент. В ФР пленках, измеренных сразу после имплантации, боковые грани отпечатка были вогнуты к центру, что свидетельствует о наличии сильных сжимающих напряжений. Имела место релаксация отпечатка после индентирования, указывающая на упругопластичные свойства ФР пленки. После хранения в течение 3 лет форма отпечатков индентора изменялась. Она становилась квадратной, искажения боковых граней отпечатка были слабо заметны, отсутствовала релаксация при комнатной температуре. После хранения пленка ведет себя как твердое (непластичное) тело.

Имплантация Ag^+ подавляет эффект восстановления отпечатка при индентировании «свежеизготовленных» ФР пленок, что проявляется как снижение значений восстановленной микротвердости при нагрузках до 5 г, когда индентор не достигает границы раздела ФР/кремний (рисунок 1). Значения восстановленной микротвердости снижались при увеличении дозы имплантации до $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. В диапазоне $\Phi = (7,5\text{--}10) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ заметных изменений значений восстановленной микротвердости ФР пленки не наблюдалось (рисунок1). Этот экспериментальный результат обусловлен образованием в области пробега ионов Ag^+ сплошного аморфного карбонизированного слоя, формирование которого заканчивается при дозе $5,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ [5].

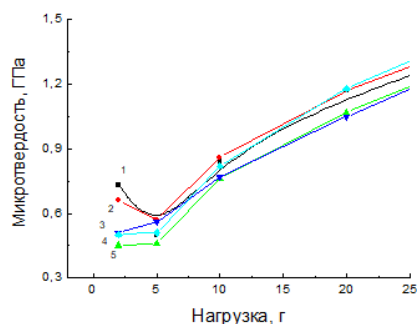


Рисунок 1 – Зависимости восстановленной микротвердости от нагрузки «свежеприготовленных» исходных (1) и имплантированных дозами $2,5 \cdot 10^{16}$ (2), $5 \cdot 10^{16}$ (3), $7,5 \cdot 10^{16}$ (4) и $1,0 \cdot 10^{17}$ (5) см^{-2} пленок фоторезиста

Длительное хранение пленок диазохиноноволачного фоторезиста ФП9120 на кремнии приводит к снижению величины восстановленной микротвердости. Имплантация Ag^+ подавляет этот эффект (рисунок 2). При хранении неимплантированных пленок значения восстановленной микротвердости снижались почти в 3 раза (с 0,7 до 0,25 ГПа), а в имплантированных образцах изменения были незначительны (до 20–30 %).

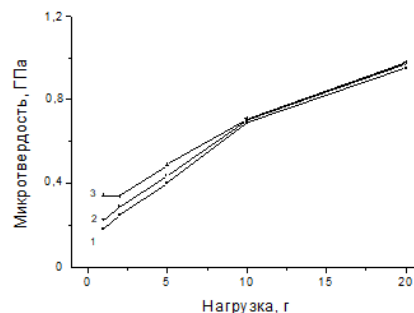


Рисунок 2 – Зависимости микротвердости от нагрузки исходных (1) и имплантированных дозой $2,5 \cdot 10^{16}$ (2) и $5,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (3) пленок фоторезиста. Срок хранения 3 года

Полученные экспериментальные результаты объяснены с учетом разложения при хранении фоточувствительного компонента фоторезиста (диазохинона) и последующего сшивания молекул фенолформальдегидной смолы, являющейся основным компонентом ФР [4; 5]. Сшивка снижает подвижность молекул в условиях внешних воздействий и ФР пленка ведет себя как твердое (непластичное) тело. Влияние имплантации Ag^+ связано с образованием сплошного аморфного карбонизированного слоя,

Литература

1. Radiation-stimulated transformation of the reflectance spectra of diazoquinone–novolac photoresist films implanted with antimony ions / A.A. Kharchenko [et al.] // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2020. – V. 14, № 3. – P. 558–561.
2. Adhesion of irradiated diazoquinone–novolac photoresist films to single-crystal silicon / S.A. Vabishchevich [et al.] // High Energy Chemistry. – 2021. – V. 55, № 6. – P. 495–501.
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. 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.
5. Радиационно-индуцированная модификация спектров отражения пленок диазохиноноволачного фоторезиста при имплантации ионов Ag^+ / А.А. Харченко [и др.] // Химия высоких энергий. – 2023. – Т. 57, № 6. – С. 1–7.

УДК 62-233.3/9

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС В КОНСТРУКЦИИ ПОЛИГРАФИЧЕСКОГО ПЕЧАТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Шевель Н.А.^{1,2}, Бурак В.А.¹, Лукьянчиков Е.А.²

¹Белорусский национальный технический университет
²РУП «Издательство Белорусский «Дом Печати»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Данная работа посвящена изучению проблемы износа зубчатых колес, используемых в цифровой полиграфической машине. В ходе исследования были рассмотрены два зубчатых колеса, изготовленные из *PLA* и *ABS* пластика, и проведено сравнение их характеристик и долговечности. Результаты показали, что зубчатое колесо, изготовленное из *PLA* пластика, более устойчиво к износу и лучше сохраняет свои эксплуатационные свойства при повышенных температурах и циклических нагрузках, и этот материал может быть рекомендован для изготовления запасных деталей к принтерам.

Ключевые слова: зубчатые колеса, цифровая полиграфическая машина, полимерные материалы, печатное оборудование.

ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF POLYMER GEARS IN THE DESIGN OF GRAPHICS PRINTING EQUIPMENT

Shevel N.^{1,2}, Burak V.¹, Lukyanchikov E.²

¹Belarusian National Technical University
²Republican unitary enterprise "PUBLISHING HOUSE "Belarusian Printing House"
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. This work is dedicated to the problems of wearing of gears used in digital printing machines. During the research, two gears made of PLA and ABS plastics were considered, and their characteristics were compared. The results showed that the gear made of PLA plastic is more resistant to wear and better maintains the operational properties under high temperatures and cyclic loads, and this material can be recommended for manufacturing spare parts for printers.

Key words: gears, digital printing machine, polymer materials, printing equipment.

Адрес для переписки: Шевель Н.А., пр. Независимости 79/1, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
e-mail: shevel48@gmail.com

На данный момент одним из важнейших аспектов в производстве является поиск инновационных подходов в изготовлении деталей, способных заместить оригинальные без ухудшения функционирования оборудования, и 3D-печать пластиковых зубчатых колес представляет собой один из таких передовых методов. Этот подход к решению проблемы ремонтов из-за внезапных отказов будет продемонстрирован на примере изготовления косозубого зубчатого колеса для принтера марки *Xerox Versant 180*. Технология 3D-печати стала надежным и эффективным решением для многих отечественных предприятий и организаций, которые столкнулись с ограничениями на импорт и доступность запасных частей.

Узел зубчатых колес, внешний вид которого показан на рисунке 1, играет ключевую роль в функционировании принтера *Xerox Versant 180* так как отвечает за транспортировку бумаги по ленте печи, в которой происходит запекание тонера принтера.

Вся механическая составляющая данного печатного аппарата строится на тесной совместной работе полимерных и металлических зубчатых колес. Такое сочетание элементов узла приводит к удешевлению и дополнительной защите, когда

зубчатое колесо, передающее движение, изготовленное из металла, при работе не изнашивается, а износу подвергается исключительно одно зубчатое колесо, изготовленное из полимера и работающее в связке с ведущим металлическим зубчатым колесом, что также является дополнительной защитой от перегрузок электроприводов, используемых для точного перемещения бумаги в печатном оборудовании.



Рисунок 1 – Редукторный узел принтера в сборе

В процессе использования цифровой полиграфической машины *Xerox Versant 180* возникла

аварийная ситуация, связанная с критическим износом косозубого зубчатого колеса, изготовленного из полимерного материала. 3D-модель этого колеса представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – 3D модель зубчатого колеса

Из-за повышенной внутренней температуры в корпусе принтера *Xerox Versant 180*, которая достигала около 60 градусов Цельсия, и интенсивного вращения входящего в комплект рассматриваемого зубчатого колеса со скоростью около 600 оборотов в минуту, произошел постепенный износ зубьев колеса. Характер разрушения зубчатого колеса, уже не обеспечивающего нормальную работу узла принтера, показан на рисунке 2. Зубья шестерни истерлись и истончились.



Рисунок 3 – Внешний вид изношенного на 80 процентов зубчатого колеса

Для решения возникшей проблемы простая оборудования было принято решение заменить оригинальное зубчатое колесо новым колесом, изготовленным с использованием 3D-принтера на предприятии. Основные геометрические параметры колеса были следующие: высота – 6,7 мм, внешний диаметр – 19 мм, число зубьев – 15, модуль – 1,25, угол наклона зуба 80° .

Было изготовлено два зубчатых колеса из различных полимеров: *PLA* и *ABS* пластика. Выбор материалов был обоснован в первую очередь доступностью данных полимеров, а также свойствами этих материалов, которые обеспечивают пригодность этих материалов для деталей, работающих под циклическими нагрузками на относительно больших скоростях.

Полилактид (*PLA*) – биоразлагаемый пластик, который характеризуется экологической дружелюбностью, простотой использования и безопасностью, а также хорошей жесткостью и детализацией, что важно при моделировании и создании мелких деталей. Однако его недостатком является ограниченная термостойкость, из-за которой он может быть чувствителен к высоким температурам [1].

ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) – инженерный пластик, который широко используется в приборостроении и машиностроении благодаря своим характеристикам, таким как прочность, ударопрочность, термостойкость, химическая стойкость, долговечность, легкообрабатываемость, изоляционные свойства и восприимчивость к *UV*-лучам.

Изготовленные колеса были установлены в оригинальный узел, после этого машина продолжила работать в штатном режиме. Во время эксплуатации оказалось, что время работы до отказа, вызванного критичным износом для зубчатого колеса, изготовленной из *ABS* пластика, в установке *Xerox Versant 180* оказалась 3 смены по 8 часов, в то время как шестерня из *PLA* пластика в режиме, предусмотренном документацией, проработала несколько месяцев без отказов и снижения качества работы печатного оборудования. Объяснить наблюдаемую ситуацию можно следующим образом:

1. *ABS* пластик обладает хорошей прочностью, но по заявленным характеристикам он менее устойчив к механическим нагрузкам и износу по сравнению с *PLA*.

2. *PLA* за счет большей вязкости, характерной для этого вида полимеров, обычно более устойчив к ударам и вибрациям, чем *ABS*. Это является одним из косвенных фактов его более качественных результатов по сравнению с *ABS*.

Таким образом, анализ свойств примененных для изготовления на замену оригинальной детали полимерных материалов и режимов работы рассматриваемого узла позволяет сделать вывод о том, что для пластиковых зубчатых колес в рассматриваемом принтере наиболее важным является обеспечение нужного значения вязкости материала, а повышенная температура в узле не оказывает особо значимого влияния на изменение характеристик материала.

Литература

1. Петрюк, И.П. *Материаловедение. Полимерные материалы и композиты* : учеб. пособие: Ч. 1 / И.П. Петрюк. – Волгоград : ВолгГТУ, 2011. – 68 с.

УДК 621.396.6.029.64

ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАССИВОВ НАНОПРОВОДОВ АНТИМОНИДА ИНДИЯ В МАТРИЦАХ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Горох Г.Г.¹, Федосенко В.С.¹, Таратын И.А.²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены результаты исследований электрофизических и термоэлектрических свойств массивов нанопроводов антимионид индия, сформированных методом электрохимического осаждения из водных растворов в пористых матрицах анодного оксида алюминия. Полученные результаты показали реальную эффективность и перспективность использования массивов нанопроводов при разработке в термоэлектрических устройств.

Ключевые слова: массивы нанопроводов, антимионид индия, термоэлектрические характеристики.

ELECTROTHERMAL STUDIES OF INDIUM ANTIMONIDE NANOWIRE ARRAYS IN ANODIC ALUMINA MATRIXES

Gorokh G.G.¹, Fedosenko V.S.¹, Taratyn I.A.²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The results of studies of the electrophysical and thermoelectric properties of indium antimonide nanowire arrays formed by electrochemical deposition from aqueous solutions in porous anodic alumina matrices are presented. The obtained results showed the real effectiveness and prospects of using nanowire arrays in the thermoelectric devices development.

Key words: nanowire arrays, indium antimonide, thermoelectric characteristics.

Адрес для переписки: Горох Г.Г., ул. П.Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
e-mail: gorokh@bsuir.by

Более двух третей энергии, затрачиваемой на производство, теряется в виде тепла, которое можно было бы использовать при преобразовании в электричество. В последнее десятилетие при разработке высокоэффективных термоэлектрических устройств большое внимание уделяется использованию в них наноструктурированных материалов, позволяющих добиться низкой теплопроводности при высокой электрической про-водимости за счет уменьшения размерности наноструктур. Использование нанопроводов с большим аспектным отношением их длины к диаметру позволяет повысить термоэлектрическую добротность и эффективность преобразования тепла в электричество.

Ранее нами были разработаны металлизированные с одной стороны проникаемые матрицы анодного оксида алюминия (АОА) для электрохимического осаждения нанопроводов [1], определены оптимальные условия осаждения нанопроводов висмута, сурьмы и антимионид индия в приготовленные матрицы, исследована их микроструктура и состав [2].

В настоящей работе исследованы электрофизические и термоэлектрические свойства массивов нанопроводов антимионид индия, сформированных методом электрохимического осаждения из водных растворов в пористых матрицах анодного оксида алюминия в виде пучков, объединенных внешними контактными площадками и соединенными последовательно в цепочки или параллельно.

В зависимости от характера измерений и последовательности их коммутации для выяснения механизма протекания электрического тока через нанопровода на поверхности разных матриц были локально сформированы разные системы контактов. Приготовленные матрицы толщиной около 35 мкм с диаметрами нанопроводов 40–45 нм были разрезаны на отдельные чипы размером 8×10 мм. На каждом чипе размещалось по две пары контактов размером 1500×1500 мкм, позволяющие коммутировать пучки нанопроводов по заданной схеме (параллельно или последовательно).

Измерения ВАХ массивов нанопроводов в порках АОА между контактами на поверхности матриц и у основания пор проводили при плавной развертке напряжения от нуля со скоростью 0,1 В/с и измерения показаний проходящего тока через массив нанопроводов до максимального значения. Измерения динамики нагрева эмиттерного и коллекторного контактов осуществляли путем измерения температуры соответствующих контактов при пропускании через верхние контакты тока, пилообразно меняющего от +60 мА до –60 мА (рисунок 1), бесконтактным методом в пределах 20–150 °С стационарным высокоточным цифровым инфракрасным пирометром IMPAC IPE 140 (LumaSense) со спектральным диапазоном 3,9 мкм. Измерения нагрева контакта проводили с точностью 0,1 °С в автоматическом режиме регистрации изменения температуры с

использованием компьютера и специализированного программного обеспечения. В процессе измерений период времени увеличения и снижения тока варьировали от 50 с 400 с.

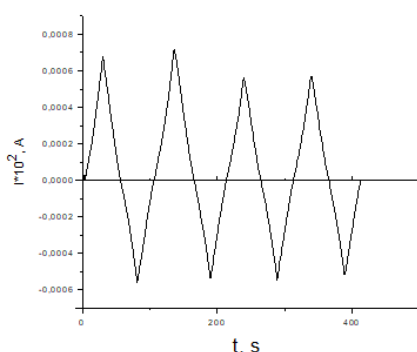


Рисунок 1 – Временная зависимость изменения тока с периодом увеличения и снижения тока 50 с

На рисунке 2 представлена типичная ВАХ для одного пучка нанопроводов. ВАХ имеет нелинейный вид, на которой можно выделить три участка. Первый характеризуется слабой зависимостью тока от 0 до 50 мА при увеличении напряжения от 0 до 2 В. На втором участке при дальнейшем росте напряжения до 3 В ток экспоненциально возрастает до 150 мА. Третий участок при увеличении напряжения до 4–4,5 В характеризуется ускоренным, практически линейным ростом тока до значения ограничения по току, равного 300 мА.

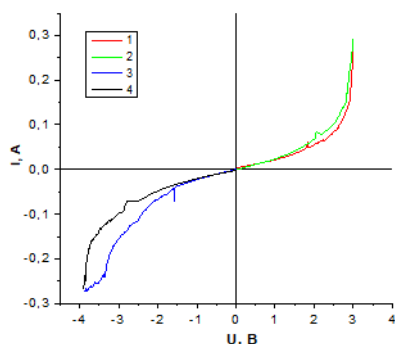


Рисунок 2 – ВАХ массивов нанопроводов антимонида индия в порах АОА от приложенного напряжения

На рисунке 3 представлена кинетика изменения температуры на эмиттерном контакте при пропускании через пучок нанопроводов пилообразно изменяющего тока от 0 до +60 мА и от 0 до –60 мА с периодом 400 секунд. За более короткие промежутки времени, снятые кинетики, имели слабовыраженную зависимость от тока, что можно

объяснить инертностью сформированной структуры. На данной зависимости показан нагрев контакта с точностью 0,1 °С, то есть при развертке тока от 0 мА до 60 мА за 200 секунд верхний контакт нагрелся на 25–27 °С в течение 250 с. При снижении тока до нуля контакт примерно по такой же кинетике охладился, обратное включение показало похожие зависимости. Нелинейность зависимостей и сдвиг по времени связан с инертностью системы и ее теплоемкостью. Вместе с тем повторяемость результатов указывает на высокую чувствительность матрицы нанопроводов из антимонида индия к приложенному напряжению или току.

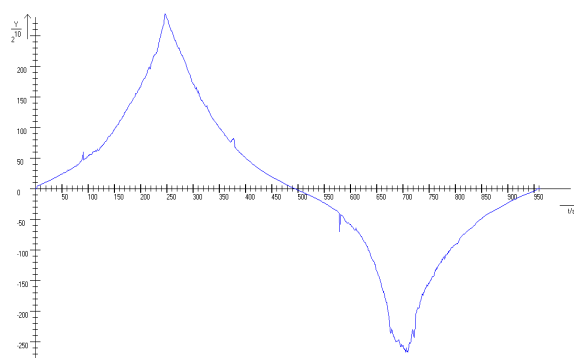


Рисунок 3 – Кинетическая зависимость нагрева и охлаждения эмиттерного контакта на пучке нанопроводов антимонида индия при динамическом пропускании через него тока от 0 до +60 мА и от 0 до –60 мА с периодом 400 секунд

Предварительные расчеты показали, что созданная наносистема может быть использована как термоэлектрическое устройство, то есть при нагреве поверхности матрицы нанопроводов из антимонида индия площадью около 2 мм² до 55 °С на концах нанопроводов выделяется электричество мощностью не менее 0,15 Вт.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Конвергенция – 2025» (задание № 3.02.4).

Литература

1. Gorokh, G.G. Indium Antimonide Nanowires Arrays for Promising Thermoelectric Converters / G.G. Gorokh, I.A. Obukhov, A.A. Lozovenko // In Proceedings of the Technology and design in electronic equipment. – 2015. – № 1. – P. 3–12.
2. Lazavenka, A. Synthesis of Bismuth Nanowires for Thermoelectric Applications / A. Lazavenka, A. Poznyak, G. Gorokh // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1124, 022013.

УДК 539.2:669(6-8)

СТРУКТУРА И МИКРОТВЕРДОСТЬ ТРОЙНОГО СПЛАВА Bi-19 МАСС.% Sn-28 МАСС. % In
Гольцев М.В.¹, Белая О.Н.¹, Шепелевич В.Г.²¹Белорусский государственный медицинский университет²Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе представлены результаты исследования микротвердости и текстуры сплава Bi-19 масс. % Sn-28 масс. % In, широко используемого в качестве низкотемпературных припоев. Показана зависимость микротвердости от скорости охлаждения расплава и нагрузки, используемой при измерении микротвердости. Изменения микротвердости быстрозатвердевших фольг обусловлено протеканием рекристаллизационных процессов, вызывающих укрупнение структуры.

Ключевые слова: высокоскоростное затвердевание, фольга, микротвердость.

THE STRUCTURE AND MICROHARDNESS OF THE TRIPLE ALLOY Bi-19 MASS.% Sn-28 MASS. % In
Goltsev M.V., Belaya O.N., Shepelevich V.G.¹ Belorussian State Medical University² Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The results of studies of the structure and microhardness of foil alloys Bi-19 mass. % Sn-28 mass. % In obtained by high-speed cooling from the liquid phase are presented. The foil alloy Bi-19 mass. % Sn-28 mass. % In widely used as low-temperature solders. The dependence of the microhardness on the rate of cooling of the melt and the load used in the measurement of microhardness is shown. Changes in the microhardness of rapidly cooled foil are due to the course of recrystallization processes that cause enlargement of the structure.

Key words: high speed solidification, foil, microhardness.

Адрес для переписки: Белая О.Н., пр. Дзержинского, 83, г. Минск, 220116, Республика Беларусь
e-mail: olnikbel@yandex.ru

Введение. Многокомпонентные сплавы системы Bi-Sn-In используются в качестве низкотемпературных припоев. Их физические свойства зависят от химического состава и структуры, формируются в процессе синтеза и термообработки [1; 2]. В связи с этим проведено исследование микротвердости сплава Bi-19 масс.% Sn-28 масс. % In, изготовленного при различных способах охлаждения.

Методика эксперимента. Сплав, содержащий 53 масс. % Bi, 19 масс.% Sn, 28 масс. % In изготовлен сплавлением компонентов при температуре 300 °С при различных скоростях охлаждения 10^5 , 10^2 , 10^{-2} и 10^{-3} К/с. Исследование микроструктуры проведено с помощью микроскопа LE 1455 VP, имеющего приставку для проведения рентгеноструктурного микроанализа. Рентгеноструктурные исследования выполнены на дифрактометре Riguka Ultimat IV. Полусные плотности дифракционных линий рассчитаны методом обратных полюсных фигур. Измерения микротвердости выполнены на приборе ПМТ-3. Погрешность измерения микротвердости составила не более 4 %.

Результаты и их обсуждение. Изображение микроструктуры образцов, изготовленных при разных скоростях охлаждения расплава, представлены на рисунке 1.

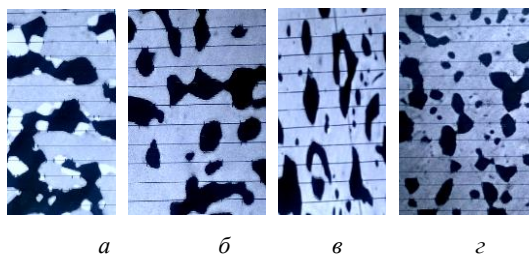


Рисунок 1 – Микроструктура тройного сплава Bi-Sn-In, изготовленных при скоростях охлаждения расплава 10^{-3} (а), 10^{-2} (б), 10^2 (в) и 10^5 (г) К/с

С увеличением скорости охлаждения межфазная граница твердого раствора висмута и ϵ -фазы и твердого раствора олова и висмута уменьшаются, и твердого раствора олова и ϵ -фазы увеличиваются, что обусловлено уменьшением объемной доли твердого раствора висмута в исследуемом сплаве.

Зависимости микротвердости сплава, изготовленного при различных условиях от нагрузки и скорости охлаждения представлена на рисунках 2 и 3.

С уменьшением скорости охлаждения расплава и увеличением величины нагрузки наблюдается возрастание микротвердости. Увеличение скорости охлаждения расплава приводит к измельчению микроструктуры, что обуславливает увеличение границ зерен и фаз, являющихся зонами пониженной прочности.

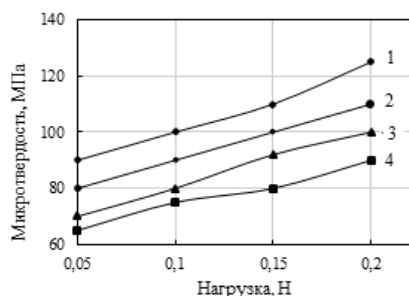


Рисунок 2 – Зависимости микротвердости сплава от нагрузки при различных скоростях охлаждения: 1 – 10^{-3} К/с, 2 – 10^{-2} К/с, 3 – 10^2 К/с, 4 – 10^5 К/с

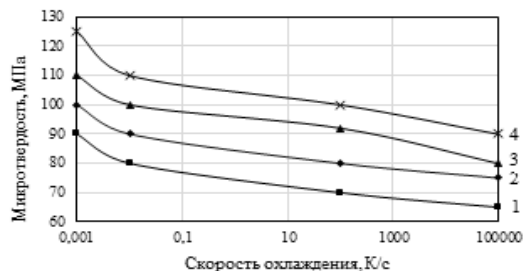


Рисунок 3 – Зависимость микротвердости сплава от скорости охлаждения при различных нагрузках: 1 – 0,05 Н, 2 – 0,1 Н, 3 – 0,15 Н, 4 – 0,2 Н

На рисунке 4 представлена зависимость сплава, полученного при скорости охлаждения 10^5 К/с, от времени отжига при температуре 70°C . Сначала с увеличением времени отжига микротвердость монотонно увеличивается, а затем после 20 ч отжига значение микротвердости достигает постоянного значения, равного 87 МПа. Температура отжига выше $0,5 T_{\text{пл}}$ ($T_{\text{пл}}$ – температура плавления фаз, входящих в сплав). Поэтому при этой температуре 70°C происходят диффузионные процессы, в результате которых улучшается структура границ зерен и фаз, что препятствует деформированию сплава, т. е. вызывает увеличение микротвердости. Также при данной температуре может происходить увеличение размера зерен и выделений фаз, что также способствует увеличению микротвердости.

Изменения полюсных плотностей дифракционных отражений, соответствующих текстурам фаз, указывает на протекание рекристаллизационных превращений в сплаве при отжиге. Но их значения значительно превосходят полюсные плотности других дифракционных линий, что свидетельствует о сохранении наблюдаемых текстур при отжиге.

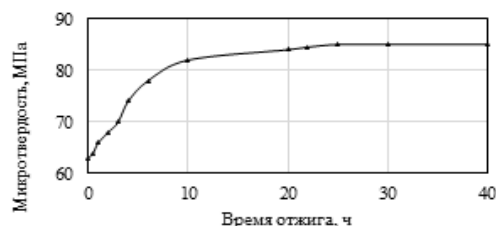


Рисунок 4 – Изменение микротвердости быстрозатвердевших фольг сплава Bi-Sn-In в процессе изотермического отжига при 70°C

В исследуемых образцах сплава наблюдается текстура его фаз: твердого раствора висмута (0009), твердого раствора олова (200) и ϵ -фаза (202). Полюсные плотности соответствующих дифракционных отражений для каждой из фаз до и после отжига при 70°C в течение 5 и 12 часов приведены в таблице.

Таблица. Полюсные плотности дифракционных линий твердых растворов висмута и олова, а также ϵ -фазы

Фаза, отражение	Исходное состояние	Отжиг 5 ч при 70°C	Отжиг 20 ч при 70°C
Твердый раствор висмута, (0009)	2,4	1,8	3,8
Твердый раствор олова, (200)	4,3	4,5	4,3
ϵ -фаза, (202)	3,9	3,2	4,5

Выводы. Таким образом, микротвердость сплава Bi-19 масс.% Sn-28 масс.% In зависит от скорости охлаждения расплава и нагрузки, используемой при измерении микротвердости. Микротвердость быстрозатвердевших фольг при отжиге 70°C монотонно увеличивается и стабилизируется через 20 ч выдержки при температуре 70°C . Изменения микротвердости быстрозатвердевших фольг обусловлено протеканием рекристаллизационных процессов, вызывающих укрупнение структуры.

Литература

1. Шепелевич, В.Г. Быстрозатвердевшие легкоплавкие сплавы / В.Г. Шепелевич. – Минск : БГУ, 2015. – 192 с.
2. Белая, О.Н. Структура и свойства припоев на основе свинца, полученных сверхбыстрой закалкой из расплава / О.Н. Белая, В.Г. Шепелевич // Весці Нацыянальнай Акадэміі навук Беларусі. Серія фізіка-тэхнічных навук. – 2006. – № 1. – С. 40–43.

УДК 544.653.2, 678.073

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ПЛЕНКАМИ ПОРИСТЫХ МАТРИЦ**

Горох Г.Г.¹, Тураходжаев Н.Д.², Худойкулов Ш.У.², Федосенко В.С.¹, Таратын И.А.³

¹*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь*

²*Ташкентский Государственный Технический Университет, Ташкент, Узбекистан*

³*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Разработаны методики формирования интеллектуальных материалов на основе пористых матриц анодного оксида алюминия, модифицированных полимерными пленками поливинилденфторида. Представлены результаты комплексных исследований механических и трибологических характеристик сформированных пленок разными физическими методами.

Ключевые слова: наноккомпозит, пористые матрицы, полимерные пленки, трибопреобразователь.

**INTELLIGENT MATERIALS BASED ON POROUS MATRIXES MODIFIED
BY FUNCTIONAL FILMS**

Gorokh G.G.¹, Turakhodjaev N.D.², Khydaykulov Sh.U.², Fedosenko V.S.¹, Taratyn I.A.³

¹*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

²*Tashkent State Technical University
Tashkent, Uzbekistan*

³*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Methods for the formation of smart materials based on porous matrices of anodic aluminum oxide modified with polymer films of polyvinylidene fluoride have been developed. The results of complex studies of the mechanical and tribological characteristics of the films formed using various physical methods are presented.

Key words: nanocomposite, porous matrices, polymer films, triboconverter.

*Адрес для переписки: Горох Г.Г., ул. П.Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
e-mail: gorokh@bsuir.by*

В основе исследования лежит идея создания интеллектуальных материалов путем синергетического использования упорядоченных нанопористых матриц и функциональных материалов в виде полимеров и пьезоэлектриков, способных к регистрации и трансформации физических воздействий. Реализация этой идеи связана с поиском конкретных соединений и способов их введения в нанопоры для получения интеллектуальных композитов, обладающих термо-, опто-, тензо- и другими видами чувствительности. Ранее проведенные исследования [1] показали зависимость модуля Юнга, коэффициента теплопроводности и других физико-механических характеристик нанопористого анодного оксида алюминия (АОА) от его объемной пористости. Использование указанного наноструктурированного материала в качестве связующего звена между монолитной (например, алюминиевой) подложкой и осаждаемым на него функциональным материалом (полимером, полупроводником и т. д.) обеспечит решение нескольких проблем. За счет уменьшения градиента коэффициентов термического расширения подложки и функционального слоя снижается концентрация межфазных термомеханических напряжений и вероятность адгезионного разрушения.

В качестве образцов использовали алюминиевую фольгу (99,99 %) толщиной 100 мкм и размером 20×40 мм, на которой формировали методом двухстадийного анодирования в 0,4 М растворе винной кислоты слой АОА толщиной 1,5 мкм. Процесс анодирования проводили в гальваностатическом режиме, плотность тока анодирования составляла $j = 6 \text{ мА/см}^2$. Напряжения стационарного роста пор составило 210 В. В качестве наполнителя использовали раствор поливинилденфторида (ПВДФ) марки Ф2М Д в диметилформамиде в пропорции 1:3. Раствор наносили на матрицу дозатором с объемом капли 0,1 мл от одной до пяти капель. После центрифугирования при $v \approx 3000 \text{ об/мин}$ в течение 20 сек. образцы подвергали многостадийной сушке и термообработке. На рисунке 1 представлены СЭМ изображения сечения матрицы АОА с пленкой ПВДФ объемом 0,1 мл (рисунок 1, а) и 0,5 мл (рисунок 1, б). При нанесении 0,1 мл раствора центрифугованием при $v \approx 3000 \text{ об/мин}$ в течение 20 с образуется тонкая равномерная пленка ПВДФ толщиной порядка 180–450 нм, заполняющая поры АОА. При нанесении раствора объемом 0,5 мл на поверхности АОА формируется пленкой ПВДФ толщиной около

2 мкм, наблюдается вытягивание полимера над порами. Поры заполнены равномерно.

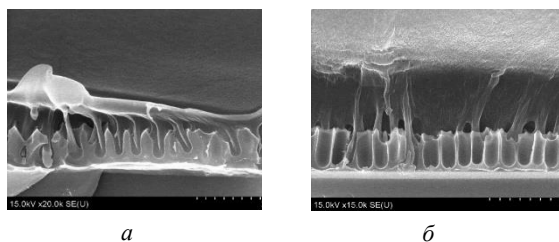


Рисунок 1 – СЭМ изображения матриц АОА с пленкой ПВДФ объемом 0,1 мл (а) и 0,5 мл (б)

Морфологию поверхности образцов, шероховатость R_a и силу адгезии F_a образцов исследовали на атомно-силовом микроскопе *Dimension FastScan (Bruker, США)* в режиме *PeakForce QNM (Quantitative Nanoscale Mechanical Mapping)* с использованием стандартного кремниевого кантилевера типа *NSC-11* (производство *Mikromash, Эстония*) с радиусом закругления острия 10 нм, с жесткостью консоли 5,93 Н/м.

Коэффициент и силу трения исследовали в режиме *Contact Mode Lateral Force* с использованием стандартного кремниевого кантилевера типа *NSC-11* (производство *Mikromash, Эстония*) с начальным радиусом закругления острия 200 нм, с жесткостью консоли 5,93 Н/м. В процессе испытаний нормальная нагрузка на зонд составила 0,623 мкН, остальные параметры поддерживались постоянными: поле износа 1×1 мкм, 50 циклов при каждой нагрузке, 128×128 точек, скорость 1,99 мкм/с.

На рисунке 2, а представлены зависимости коэффициента трения покрытия ПВДФ на матрицах АОА для разной толщины покрытия (0,1 мл и 0,5 мл) при измерении кантилевером с радиусом закругления 200 нм и 10–80 нм.

В таблице 1 приведены средние значения рассчитанных из зависимостей силы и коэффициента трения для исследуемых пленок.

Исследование механических свойств пленок ПВДФ разного объема на пористых матрицах проводили методом наноиндентирования. Для получения зависимостей использовался наноиндентор модели *750 Ubi (Hysitron, США)* с наконечником Берковича с радиусом закругления 100 нм. На каждом образце было выполнено по 9 индентирований.

На рисунке 2, б показана зависимость сила адгезионного взаимодействия между наконечником зонда и поверхностью пленки ПВДФ на пористых матрицах АОА от приложенной нагрузки. Из приведенных зависимостей на рисунке 2, б можно заметить, что адгезия к матрице АОА выше у более толстой пленки ПВДФ. Результаты расчета приведенной удельной энергии исследуемых пленок ПВДФ на пористых матрицах к площади контакта показали, что более высокие значения удельной энергии у толстых пленок. Результаты определения модуля упругости и микротвердости исследуемых пленок приведены в таблице 2.

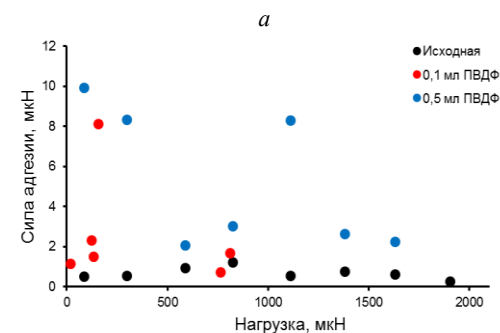
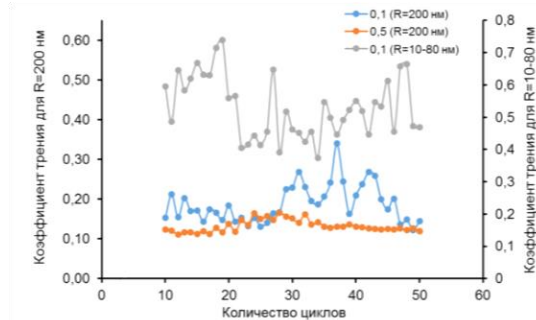


Рисунок 2 – Зависимости коэффициента силы трения покрытия ПВДФ на матрицах АОА (а) и зависимости силы адгезионного взаимодействия между наконечником зонда и поверхностью пленки ПВДФ на пористой матрице АОА от приложенной нагрузки (б)

Таблица 1. Средние значения силы и коэффициента трения

Образец	$k_{тр}$	$F_{тр}, \text{нН}$
0,1 мл ПВДФ (при $R = 200 \text{ нм}$)	$0,187 \pm 0,047$	$117,9 \pm 29,7$
0,5 мл ПВДФ (при $R = 200 \text{ нм}$)	$0,132 \pm 0,015$	$82,2 \pm 9,2$
0,1 мл ПВДФ (при $R = 10-80 \text{ нм}$)	$0,533 \pm 0,093$	$330,4 \pm 58,5$

Таблица 2. Средние значения модуля упругости и микротвердости матрицы АОА с пленкой ПВДФ

Образец	$E, \text{ГПа}$	$H, \text{ГПа}$
Исходная матрица АОА	$32,59 \pm 12,51$	$0,44 \pm 0,29$
АОА с 0,1 мл ПВДФ	$38,76 \pm 4,75$	$0,77 \pm 0,09$
АОА с 0,5 мл ПВДФ	$24,54 \pm 12,39$	$0,30 \pm 0,15$

Из приведенных данных видно, что средние значения модуля упругости и микротвердости возрастают на тонких пленках ПВДФ по сравнению и исходной матрицей АОА, и, наоборот, снижаются на толстых пленках ПВДФ.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований (договор № Ф21УЗБГ-003).

Литература

1. Полимерсодержащие нанокompозитные покрытия для изделий машиностроения / Г.Г. Горох [и др.] // Труды международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века». – 2020. – Р. 45–49.

УДК 681.2.082:531.45

ДИНАМИКА СВОБОДНЫХ КАЧАНИЙ ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАГРУЗКАХ**Ризноокая Н.Н.¹, Касьмин В.Ю.²**¹Белорусский национальный технический университет²Республиканское унитарное предприятие «Научно-производственный центр многофункциональных беспилотных комплексов» Национальной академии наук Беларуси

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработана конструкция маятника с различной массой при постоянных габаритных размерах и изготовлена с использованием 3D печати. Проведен анализ влияния нагрузки на трение качения. Проведены экспериментальные исследования трения качения в режиме предварительного смещения при различной нагрузке для одинаковых пар трения.

Ключевые слова: трение качения, нагрузка, момент трения качения, предварительное смещение.

A PHYSICAL PENDULUM FREE SWINGING DYNAMICS UNDER DIFFERENT LOADS**Riznookaya N.N.¹, Kasmin V.Y.²**¹Belarusian National University of Technology²Republican Unitary Enterprise "Research and Production Center for Multifunctional Unmanned Complexes" of the National Academy of Sciences of Belarus

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A pendulum structure of variable mass with constant overall characteristics has been developed and manufactured using 3D printing. The influence of load on rolling friction was analyzed. Experimental studies of pre-rolling friction were carried out at various loads for the same friction pairs.

Key words: rolling friction, load, rolling friction moment, pre-displacement.

Адрес для переписки: Н.Н. Ризноокая, пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: Riznookaya@bntu.by

Маятниковый метод измерения трения качения является одним из наиболее чувствительных методов исследования поверхности материалов [1]. Однако, применение этого метода для исследования физико-механических параметров поверхности материалов в области предварительных смещений сдерживается отсутствием методов и средств, позволяющих разделить механизмы трения качения, связанные с упругим гистерезисом материала (нагрузка), силами адгезии и наличием проскальзывания в опорах качения.

В данной работе авторами использовался ранее разработанный маятниковый метод [1] позволяющий измерить несколько параметров трения качения в режиме предварительного смещения и таким образом исследовать динамику данного процесса.

Целью данного исследования являлось исследование динамики свободных качаний физического маятника при различных нагрузках.

Трение как физический процесс. Исторически, при исследовании и описании трения скольжения и качения рассматривалось движение тел с постоянной скоростью. И в рамках данной модели «коэффициент трения качения» определяется как

$$f_k = \frac{M_{ск}}{P}, \quad (1)$$

где $M_{ск}$ – момент сопротивления качению, P – нормальная сила.

Момент сопротивления качению для режима предварительного смещения в соответствии с [1] определяется по формуле

$$M_{ск}(\varphi) = \left[-mgR(c + b\varphi^p) \operatorname{sign}\left(\frac{d\varphi}{dt}\right) \right] + \left[2\gamma a^2 R |\varphi|^{n+1} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{R}{a}\varphi\right) \cdot \operatorname{sign}(\varphi) \right] \quad (2)$$

где φ – угол отклонения маятника от положения равновесия, m – масса маятника; g – ускорение свободного падения; R – радиус шарика; c , b , p – параметры аппроксимации, определяемые из экспериментальной зависимости амплитуды от времени, a – радиус пятна контакта; γ , n – параметры аппроксимации, определяемые из экспериментальной зависимости периода от амплитуды.

Конструкция маятника. Основным критерием для проведения исследований являлось создание маятника с возможностью изменения массы при постоянстве габаритных размеров конструкции.

Изменение массы конструкции без изменения габаритных размеров достигнуто при помощи 3D печати с технологией послойного наложения материала (FDM) за счет полостей в маятнике. В конструкцию заложен массив шестигранных полостей, что позволило исключить провисание пластика при печати и упростило регулировку массы.

Было изготовлено 3 вида маятника с массами, указанными в таблице 1.

Таблица 1

	Масса основания, грамм	Масса маятника, грамм
Маятник 1	49,98	77,38
Маятник 2	40,53	67,93
Маятник 3	38,55	65,95

Результаты измерений и расчетов. В экспериментах использовались маятники различной массы, в которых в качестве опоры использовался шарик радиусом $R = 5$ мм, выполненный из нитрида кремния ($E_{ш} = 3,1 \cdot 10^{11}$ Н/м², $\nu_{ш} \approx 0,26$). Исследования проводились на плоских образцах, выполненных из стекла К8 ($E_{обр} = 806,5 \cdot 10^8$ Па, $\nu_{обр} \approx 0,209$).

Радиус пятна контакта шарика и образца, вычисленный по формулам Герца a , глубина внедрения шарика в образец δ , значения контактного угла β приведены в таблице 2

Таблица 2

	a , мкм	δ , мкм	β , угл. мин.
Маятник 1	32,7	0,21	22,5
Маятник 2	33,4	0,22	22,9
Маятник 3	34,8	0,24	23,9

Результаты измерения амплитуды колебания от времени и периода от амплитуды при различных массах маятника представлены на рисунках 1 и 2.

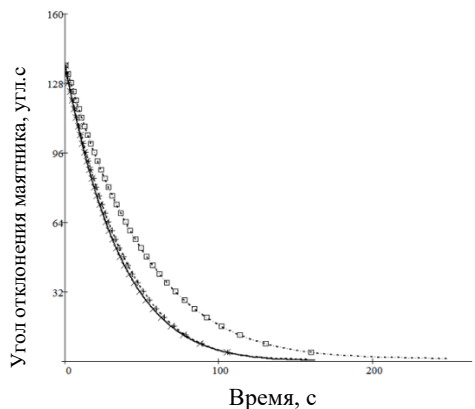


Рисунок 1 – Зависимость амплитуды колебаний маятника от угла отклонения маятника: 65,95 гр (+); 67,93 гр (x); 77,38 гр (□)

Коэффициент трения качения и момент трения уменьшаются с ростом массы маятника, при этом зависимость носит характер близкий к линейному (рисунок 3).

В результате расчета коэффициента трения качения по формуле (1) с учетом (2) для $\alpha = 138$ угл. с представлены в таблице 3.

Следует отметить, что при уменьшении массы маятника возрастает разброс результатов, что говорит о возрастании влияния свойств поверхности на маятник с уменьшением массы последнего.

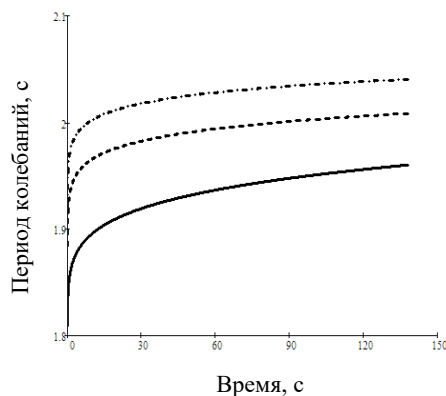


Рисунок 2 – Результаты измерений зависимости периода колебаний маятников от амплитуды: 65,95 гр (-); 67,93 гр (- -); 77,38 гр (-•-•)

Таблица 3

	Коэффициент трения качения, 10^{-8} м,	Масса маятника, грамм
Маятник 1	$5,7 \cdot 10^{-8}$	77,38
Маятник 2	$7,4 \cdot 10^{-8}$	67,93
Маятник 3	$8,6 \cdot 10^{-8}$	65,95

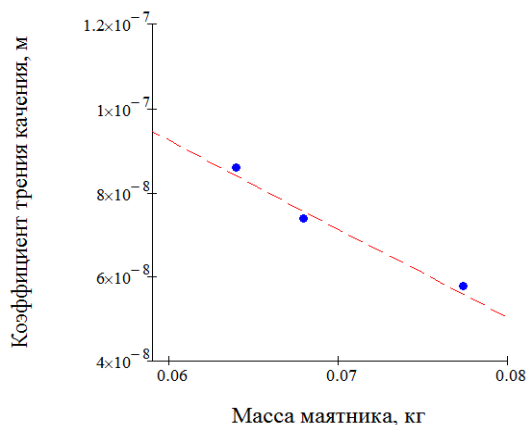


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента трения качения от массы маятника: – экспериментальные данные (•); аппроксимирующая кривая (- - -)

Заключение. Зависимость коэффициента трения качения от массы маятника и зафиксированный эффект возрастания разброса результатов при уменьшении массы маятника, говорят о возрастании влияния свойств поверхности на маятник с уменьшением массы последнего, что свидетельствует о зависимости параметров трения от массы маятника в режиме предварительного смещения.

Литература

1. Джилавдари, И.З. Устройство и методика измерения моментов сил сопротивления качению на пятне контакта / И.З. Джилавдари, С. Мекид, Н.Н. Ризноокая // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10, № 4. – С. 308–321.

Секция 4. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681.94

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ
ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Алексеев В.А.¹, Усольцева А.В.¹, Усольцев В.П.¹, Юран С.И.²

¹Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

²Удмуртский государственный аграрный университет
Ижевск, Российская Федерация

Аннотация. Работа посвящена разработке методики задания универсальных режимов гравирования неметаллических материалов. Проведенные исследования показали наличие корреляционно-регрессионной связи между качеством поверхности и особенностями технологии лазерного гравирования. С учетом этих связей выбраны режимы лазерного гравирования. Показано, что для получения наиболее четкого и контрастного изображения необходима глубина проникновения лазерного излучения в материал на 0,3–0,5 мм. Полученные результаты эксперимента по заданию режимов лазерного гравирования материалов в зависимости от мощности лазерного излучения, скорости обработки и диаметра пятна фокусирования позволяют повысить эффективность применения лазерных технологий.

Ключевые слова: лазерное гравирование, качество поверхности, режимы гравирования.

INVESTIGATION OF LASER TREATMENT MODES
SURFACES OF MATERIALS

Alekseev V.A.¹, Usoltseva A.V.¹, Usoltsev V.P.¹, Yuran S.I.²

¹Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov

²Udmurt State Agrarian University
Izhevsk, Russian Federation

Abstract. The work is devoted to the development of a methodology for setting universal modes of engraving of non-metallic materials. The conducted studies have shown the presence of a correlation-regression relationship between the surface quality and the features of laser engraving technology. Taking into account these connections, laser engraving modes are selected. It is shown that in order to obtain the clearest and most contrasting image, the depth of penetration of laser radiation into the material by 0.3–0.5 mm is necessary. The obtained results of the experiment on setting the modes of laser engraving of materials depending on the power of laser radiation, processing speed and the diameter of the focusing spot make it possible to increase the efficiency of using laser technologies.

Key words: laser engraving, surface quality, engraving modes.

Адрес для переписки: Юран С.И., ул. Студенческая, 11, г. Ижевск, 426069, Российская Федерация
e-mail: yuran-49@yandex.ru

Создание промышленно-художественных изделий высокого уровня требует постоянного развития и усложнения приемов, используемых для проектирования, применения прогрессивных инновационных технологий для производства.

В значительной степени от качества поверхности зависят эксплуатационные характеристики изделий и эстетические свойства продукции. Важное значение имеет качество поверхности в производстве товаров декоративно-прикладного искусства. Особую перспективу имеет производство товаров декоративно-прикладного искусства на индустриальной основе.

В сравнении с другими видами художественной обработки: гранением, шлифованием, абразивно-струйным гравированием, электронно-ионным и др. лазерная обработка имеет ряд существенных преимуществ [1]. Лазерные технологии позволяют учесть некоторый диапазон изменения

индивидуальных характеристик используемого материала, определяющих режимы обработки.

Алгоритм управления процессом лазерной поверхностной обработки представляет собой самообучающуюся технологическую систему, основой которой являются математические модели, отражающие функциональные связи параметров лазерного нагрева с параметрами лазерного луча, параметрами условий обработки и параметрами обрабатываемого материала.

На базе математических моделей, с учетом ограничивающих факторов (диапазон глубин лазерного воздействия, диапазон твердости, диапазон износостойкости, шероховатость поверхности и т. д.), осуществляется корректировка параметров нагрева и производится расчет основных управляющих технологических параметров – мощности излучения, скорости обработки и диаметра пятна фокусирования [2].

При разработке конкретного технологического процесса приходится учитывать множество факторов, имеющих случайный характер, изменяющихся нелинейно. В литературе нет аналитических выражений, позволяющих провести расчет шероховатости поверхности. Существующие методики имеют такие недостатки как ограниченность применения, необоснованное использование большого количества рабочего материала и части рабочей продукции, увеличение времени на проведение указанных работ и дополнительное составление испытательных программ.

Целью работы является улучшение качества поверхности промышленно-художественных изделий за счет рациональной технологии лазерного гравирования.

В работе решались следующие задачи:

- изучение особенностей лазерной технологий объемного гравирования на поверхности промышленно-художественных изделий;
- выявление закономерностей процесса гравирования неметаллических материалов;
- установление взаимосвязей между технологией лазерной обработки и качеством поверхности;
- исследование процессов, протекающих в материале при лазерной обработке и их влияние на качество изделия;
- разработка методики задания режимов, гравирования неметаллических материалов и практических рекомендаций по проектированию технологических процессов декоративно-художественного оформления изделий;
- разработка регрессионной модели для расчета показателей качества элементов поверхности, позволяющей совершенствовать дизайн изделия и проектировать технологию обработки.
- установление корреляционных связей между качеством поверхности при лазерной обработке и свойствами обрабатываемого материала;
- практическое апробирование технологии гравирования изображений на поверхности промышленно-художественных изделий в промышленных условиях.

Для определения аналитических выражений применен метод интерполяции и экстраполяции с использованием аппроксимации по методу наименьших квадратов. Для выбора длины волны лазерного излучения использована зависимость светопрозрачности материала от длины волны. Определение этой функциональной зависимости проведено на основании полученных и приведенных в литературе статистических данных.

В результате анализа показано, что для получения наиболее четкого и контрастного

изображения необходима глубина проникновения лазерного излучения в материал на 0,3–0,5 мм. Этого достаточно для получения стабильного контура резки, высокохудожественного контрастного вида изображений, необходимой адгезии при заполнении изображения красителем.

С учетом установленных функционально-корреляционных связей между режимами работы лазерной установки выбраны режимы лазерного гравирования для проведения экспериментов:

- максимальная мощность лазерного излучения 9,6 Вт;
- скорость лазерного гравирования 27,0 см/сек;
- разрешающая способность 500 dpi;
- частота импульсов 1000 Гц;
- диаметр сфокусированного лазерного луча на материале 0,1 мм.

Качество поверхности после лазерного гравирования оценивалось по глубине лазерной гравировки, величине измеренных микронеровностей, дисперсии отклонения микронеровностей, блеску поверхности и опросу потребителей.

Исследование проводилось с использованием оборудования:

- лазерная установка *Trotec Speedy 300*;
- микроинтерферометр МИИ 4;
- денситометр ДНС-2;
- фотоэлектрический блескомер ФБ-2;
- приборы для измерения твердости материалов по Шору ТВР-А;
- аппарат измерения модуля упругости *LMEC-2a*.

Проведенные исследования показали наличие корреляционно-регрессионной связи между качеством поверхности и особенностями технологии лазерного гравирования. Полученные результаты эксперимента по заданию режимов лазерного гравирования материалов в зависимости от мощности лазерного излучения позволяют повысить эффективность применения лазерных технологий.

Полученные результаты позволяют успешно компенсировать имеющиеся естественные неоднородности материала, стабильно добиваться высоких результатов при промышленном изготовлении высокохудожественных эксклюзивных изделий.

Литература

1. Промышленная лазерная маркировка и гравировка металлических и неметаллических изделий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://laserform.ru/technologies/tehgravirovka.html>.
2. Способ лазерной обработки поверхности материалов: патент РФ 2801913 / В.А. Алексеев, В.П. Усольцев, А.В. Усольцева, С.И. Юран. – Оpubл. 18.08.2023.

УДК 681.2.084

КОНСТРУКЦИЯ ТОЧЕЧНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ДЫМОВЫХ ПОЖАРНЫХ ИЗВЕЩАТЕЛЕЙ И ЛОЖНЫЕ СРАБАТЫВАНИЯ

Антошин А.А., Третьяк И.Б.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Дымовые оптико-электронные пожарные извещатели являются эффективным средством выявления пожара на начальных стадиях. Их конструкция должна обеспечить высокую чувствительность и устойчивость к ложным срабатываниям. В работе на основании обзора отечественных и зарубежных материалов выделены основные тенденции конструирования дымовых пожарных извещателей и направления для дальнейших исследований.

Ключевые слова: пожарный извещатель, дымовая камера, рассеяние, ложные срабатывания.

DESIGN OF POINT OPTOELECTRONIC SMOKE DETECTORS AND FALSE ALARMS

Antoshyn A.A., Tratsiak I.B.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Smoke optical-electronic fire detectors are an effective means of detecting fire in the initial stages. Their design should ensure high sensitivity and resistance to false alarms. Based on a review of domestic and foreign materials, the work highlights the main trends in the design of smoke fire detectors and directions for further research.

Key words: fire detector, smoke chamber, scattering, false alarms.

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

Использование эффекта взаимодействия частиц дыма с излучением, реализуемое применением источника и приемника оптического излучения, форма образовавшихся световых потоков, а также геометрия корпуса дымовой камеры определяют чувствительную область оптико-электронных дымовых пожарных извещателей и его технические характеристики.

При этом создание преград для попадания дыма не допускается, а также, требуется обеспечить надежную работу устройства, минимизировать ложные срабатывания, исключить паразитную засветку. Необходимо стремиться к повышению технологичности изделия, снижению его себестоимости, созданию привлекательного внешнего вида.

Несмотря на большое количество исследований в области разработки устройств, чувствительных к факторам пожара, конструкция пожарных извещателей еще далека от совершенства. Это объясняется большим количеством взаимосвязанных факторов, подлежащих контролю. К ним относятся: условия в конкретном помещении – геометрия, размеры, свойства воздушной среды; виды осуществляемой деятельности; наличие, тип и расположение горючих материалов; природа, характер и скорость развития пожара; технические характеристики пожарного извещателя. Изменение хотя бы одного из параметров может значительно повлиять на качество работы дымового оптико-электронного пожарного извещателя.

Теоретический расчет зависимости качества работы извещателя от расположения его основных конструктивных элементов при определенном наборе внешних факторов может быть только вспомогательным средством, определяющим приблизительное направление конструкторских работ, которые должны сопровождаться большим объемом тестовых испытаний. Например, [1] проведено математическое моделирование и последующие испытания по определению оптимального расположения источника и приемника излучения при конструировании дымовой камеры пожарного извещателя, работающего на эффекте рассеяния. Рассматривалось горение дерева, хлопкового фитиля, бензина. При этом на основании математических расчетов были определены в качестве наилучших углы в районе 40° и 70°. Экспериментальные данные при горении дерева и бензина совпали с математическими расчетами, а исследования горения хлопкового фитиля при малых углах рассеяния расчет не подтвердились. Таким образом была предложена конструкция извещателя с углом расположения источника и приемника излучения 70°.

При выборе оптимального угла расположения источника и приемника излучения становится возможным отказаться от использования дымовой камеры [2], а проведя аэродинамический расчет заполняемости дымом извещателя [3] добиться увеличения контролируемой площади в помещении.

Регистрация фотоприемником рассеянного излучения в дымовой камере произойдет независимо от природы появившихся внутри частиц. Для сокращения числа ложных срабатываний необходимо разграничение пожарным извещателем сигналов от бытовых аэрозолей, таких как пары воды, сигаретный дым, испарения при работе кухонных плит от дыма, возникающего при различных типах горения разнообразных материалов. В [4] предлагается метод определения характера дыма, основанный на том, что частицы разных аэрозолей имеют отличающуюся интенсивность рассеяния под одним и тем же углом относительно луча падающего света. Получая сигналы рассеянного света под несколькими расчетными углами и обрабатывая данные этих сигналов, можно различить частицы разных материалов. Конструкция предложенного устройства состоит из инфракрасного полупроводникового лазера, четырех фотодиодов, закрепленных под углами 30°, 60°, 90° и 120° и блока обработки сигналов. Экспериментальные данные показывают, что с помощью этого метода можно различить сигаретный дым, дым от горения керосина и водяной пар со степенью распознавания более 95 %.

К разновидностям рассмотренного метода можно отнести использование в качестве источника излучения белого света [5], трех узкополосных фотоприемников и зонированной поверхности окрашенной в цвета чувствительности приемников и изолированной от них перегородкой. Благодаря вогнутой форме поверхности белый свет в ждущем режиме отражается от нее и выводится из камеры. При появлении дыма происходит рассеяние света и попадание на приемные элементы, сигналы которых анализируются микроконтроллером.

Технология Dual Ray предусматривает использование сигналов от инфракрасного и синего светодиодов и применяется в линейке моделей пожарных извещателей Bosch FAP-DO 420. Использование синего светодиода с длиной волны в два раза меньше инфракрасной позволяет более точно идентифицировать помеховые воздействия, и минимизировать ложные срабатывания [3]. Как разновидность, для обеспечения подобного эффекта предлагается применение двух узкополосных комплектов излучателей и приемников [6] или применение фотоприемников, чувствительных к поляризованному излучению разной направленности [7].

Помимо устройств, работающих с рассеянным излучением, предлагается использование мультисенсорных пожарных извещателей, сочетающих в работе несколько физических эффектов. Например, предлагается регистрация и сравнение сигналов от

проходящего и рассеянного излучения, с разветвлением оптической оси с помощью призмы [8], или отражающей поверхности [9], что позволяет вычислить электронными методами шумовую засветку оптической камеры, или разработка комбинированных извещателей, включающих объединение в одном корпусе нескольких устройств [10].

На основании приведенного обзора, в качестве перспективных направлений для дальнейших исследований можно выделить определение влияния конструкции дымовой камеры на чувствительность оптико-электронного пожарного извещателя и возникновение ложных срабатываний, а также поиск методов формирования оптимальной формы чувствительной области внутри дымовой камеры.

Литература

1. Optimization of Sensitivity Characteristics of Photoelectric Smoke Detector to Various Smokes / T. Nagashima [et al.] // R&D Laboratories, Hochiki Corporation 246 Tsuruma, Machidashi. – 1994.
2. Smoke sensor: patent CN 218100392 / Yang Yuhai, Chen Zhenqiang. – Espacenet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/084452872/publication> 20.12.2022.
3. Неплохов, И. Развитие дымовых извещателей / И. Неплохов // Грани безопасности. – 2008. – № 5 (53). – С. 22–25.
4. Discrimination of Smoke Particles Using Infrared Photoelectrical Detection / J. Li [et al.] // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 2001. – Vol. 22, № 1.
5. Detection device: patent JP 2022183856 / Okado Tomohiro, Nagae Yuki, Takeda Junpei [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/084437964/publication> 13.12.2022.
6. Патент CN115482643 Fire smoke detector and detection method thereof / Li Kaiyuan; Liu Gang, Yuan Hongyong, Chen Tao, Huang Lida, Sun Zhanhu [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/084421792/publication> 24.08.2022.
7. Apparatus and method for detecting fire based on polarized light scattering: patent KP 20220160308 / Yang Hoe Sung; Kim Soo Cheol [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/084407456/publication> 27.05.2021.
8. Конструкция и алгоритм работы лазерного комбинированного пожарного извещателя / А.И. Кицак [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 15–22.
9. Smoke detectors: patent JP 2022186842 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/072520129/publication> 20.01.2023.
10. Duric, A. Principles of ASA fire detection technology / A. Duric // Siemens Switzerland Ltd. – 2012.

УДК 535.317; 681.7

ЗЕРКАЛЬНЫЕ КОНЦЕНТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С РАЗЛИЧНЫМ ЧИСЛОМ ОТРАЖЕНИЙАртюхина Н.К.¹, Алешкевич К.В.¹, Стуканова В.А.¹, Самбрано Лус Фабиола²¹Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

²Центр астрономических исследований им. Франсиско Х.Дуарте (CIDA)

Мерида, Венесуэла

Аннотация. Представлен анализ базовых схем и результаты расчета зеркальных концентрических систем с различным числом отражений от поверхностей зеркал.

Ключевые слова: зеркальный объектив, коррекция aberrаций, качество изображения.

MIRROR CONCENTRIC SYSTEMS WITH DIFFERENT NUMBER OF REFLECTIONSArtyukhina N.K.¹, Aleshkevich K.V.¹, Stukanova V.A.¹, Zambrano L.F.²,¹Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

²Francisco H. Duarte Center for Astronomical Research

Merida, Venezuela

Abstract. The analysis of basic schemes and calculation results of mirror concentric systems with a different number of reflections from mirror surfaces are presented.

Key words: mirror lens, aberration correction, image quality.

Адрес для переписки: Алешкевич К.В., ул. Я. Коласа, 22 – 604, а, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
e-mail: kari.alyshkevich@gmail.com.

При конструировании зеркального объектива возникает сложность борьбы с aberrациями путем наращивания числа оптических элементов, составляющих объектив. Хотя из-за отсутствия хроматических aberrаций число элементов может быть существенно меньшим по сравнению с линзовыми, но в силу своей непрозрачности зеркала способны эффективно затенять друг друга и закрывать путь для прохождения лучей. Существуют различные алгоритмы оптотехнических расчетов, которые позволяют находить такие сочетания форм и расположения зеркал, при которых осуществляются эффективно и компенсация aberrаций, и прохождение пучков лучей.

Среди группы зеркальных систем следует отметить концентрические, которые теоретически могут развивать относительное отверстие более 1:1 и поле зрения свыше 20° [1]. Особенностью таких систем является то, что при расположении входного зрачка в центре кривизны зеркальных поверхностей отсутствуют aberrации: комы, астигматизма и дисторсии ($S_{II} = S_{III} = S_V = 0$). Кривизна поверхности изображения 3-го порядка не подлежит исправлению. Сферическая aberrация в общем случае не исправлена.

Цель работы – определить соотношения между конструктивными параметрами концентрической системы, при которых сферическая aberrация окажется скорригированной и сохраняется высокое качество изображения.

В процессе выполнения работы проанализированы конструкции зеркальных систем с различным числом отражений. Рассмотрены две схемы,

где световой луч претерпевает два последовательных отражения: от выпуклого и затем от вогнутого зеркала (рисунок 1).

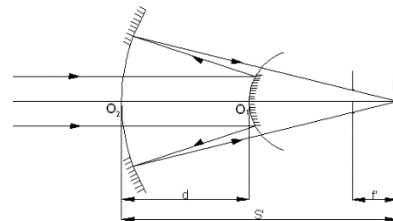


Рисунок 1 – Ход луча от удаленного предмета

При составлении алгоритма расчета получены уравнения, определяющие сферическую aberrацию 3-го порядка (сумм Зейделя) [2]. Имеем уравнение aberrационной коррекции сферической aberrации при расположении предмета на конечном расстоянии при следующих условиях нормировки:

$$\alpha_1 = \beta, \alpha' = 1, n_1 = -n_2 = n_3 = 1, h_1 = s_1 \beta.$$

$$\begin{aligned} \bar{S}_I = & \frac{\kappa^3}{4(\kappa-1)^3} \{S_1 \beta^3 [2\beta(1 - \frac{1}{\kappa}) + S_1 \beta] + [S_1 \beta + \\ & + \frac{2(\kappa-1)^2}{\kappa} \beta f' + 2(\kappa-1)S_1 \beta f'] \times \\ & \times [1 - \frac{1}{\kappa} - \beta(1 - \frac{1}{\kappa}) - S_1 \beta]^2 [1 - \frac{1}{\kappa} + S_1 \beta]\}. \end{aligned}$$

В результате анализа уравнения и проведения численных расчетов с использованием компьютерного пакета прикладных программ «Опал» найдены приближенные зависимости $k = f(\beta)$ при исправлении сферической aberrации ($S_I = 0$). Параметр $k = r_2/r_1$, β – линейное увеличение.

$$k = 0,382 + 0,660\beta \text{ при } \beta = -(0-0,2^X);$$

$$k = 2,618 - 5/\beta \text{ при } \beta = -(10^X-100).$$

Графическая интерпретация результатов расчета представлена на рисунке 2.

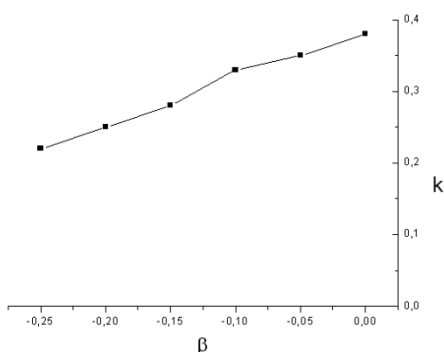


Рисунок 2 – Схема выбора конструктивных параметров зеркального объектива

Меняя условия нормировки для схемы (рисунок 1): $\alpha_1 = 0$, $\alpha' = 1$, формула сферической аберрации 3-го порядка упрощается:

$$\bar{S}_1 = -\frac{1}{4} \left(\frac{2k-1}{k-1} \right)^2.$$

Соответственно значения параметра k :

$$k = 0,382, k = 2,618 \text{ при } S_1 = 0.$$

При необходимости коррекции сферической аберрации высшего порядка следует незначительно изменить отношение $k = r_1/r_2$, оставляя прежнюю коррекцию: $S_{II} = S_{III} = S_V = 0$.

В ходе работы были проанализированы варианты конструкции концентрических объективов с тремя и четырьмя отражениями, обеспечивающие получение изображения высокого качества при оптимальных конструктивных параметрах. На основе представленной методики были предложены модификации с асферическими зеркалами при оптимизации базового концентрического зеркального модуля.

На рисунке 3 представлены схемы концентрического двухзеркального объектива с четырьмя отражениями от сферических зеркал, расположенных на расстоянии равной разности радиусов их кривизны и объектива, состоящего из двух гиперболических зеркал, основными достоинствами которых являются простота конструкции и изготовления.

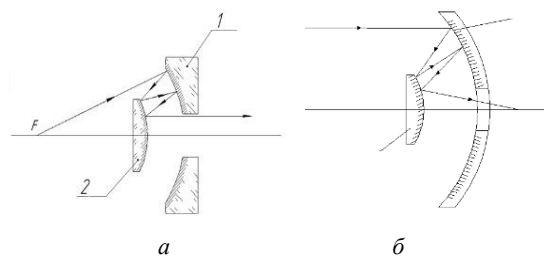


Рисунок 3 – Двухзеркальные объективы с четырьмя отражениями: а – концентрический двухзеркальный объектив; б – объектив из двух гиперболических зеркал

В работе также проанализированы конструкции объектива, состоящие из трех вогнутых концентрических зеркал, обеспечивающие анастигматическую коррекцию [3].

Получены результаты:

- предложенные аналитические выражения позволяют значительно упростить поиск конструкций концентрических двухзеркальных объективов с заданными характеристиками, сферическая аберрация которых исправлена;
- проведено моделирование и расчет двух и трехзеркальных концентрических объективов для различных технических характеристик;
- предложенные оптические модули позволяют получать изображение, как в фокальной плоскости, так и в бесконечности, что дает возможность их применения в различного рода приборах, не ограничивая при этом спектральную область использования, в связи с отсутствием преломляющих элементов;
- введение дополнительных элементов усложняет конструкцию и может значительно влиять на ее габаритные размеры, но они обеспечивают компактность схем при заданной коррекции аберраций [3].

Литература

1. Попов, Г.М. Современная астрономическая оптика / Г.М. Попов. – Л. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 192 с.
2. Запрягаева, Л.А. Расчет и проектирование оптических систем / Л.А. Запрягаева, И.С. Свешникова. – М. : Логос, 2000. – 584 с.
3. Артюхина, Н.К. Синтез зеркальных светосильных объективов с плоским зеркалом / Н.К. Артюхина // Метрология и приборостроение. – 2019. – № 1 – С. 28–33.

УДК 629.8

ОБНАРУЖЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ СЛЕЖЕНИЯ

Баранова В.С., Лешкевич С.В., Спиридонов А.А., Ушаков Д.В., Саечников В.А.

Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлен метод обнаружения космических объектов оптической системой слежения с использованием опорных масок, построенных на основе связи формы Фурье спектров разностных кадров видео последовательности и орбитальных параметров космических объектов.

Ключевые слова: оптические измерения, космический объект, система обнаружения, Фурье образ.

SPACE OBJECTS DETECTION BY GROUND-BASED OPTICAL TRACKING SYSTEM

Baranova V.S., Liashkevich S.V., Spiridonov A.A., Ushakov D.V., Saetchnikov V.A.

Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A method for detecting space objects by an optical tracking system using reference masks constructed based on the dependence between the Fourier spectra of the video sequence difference frame and the space object orbital parameters is presented.

Key words: optical measurements, space object, detection system, Fourier transform.

Адрес для переписки: Баранова В.С., ул. Курчатова, 5, г. Минск, 220108, Республика Беларусь
e-mail: vbaranova@bsu.by

Обнаружение космического объекта с использованием оптических данных измерений эквивалентно классической задаче обнаружения сигнала в принятой реализации некоторого процесса в присутствии квазипериодического шума. Альтернативой классическому методу оптических измерений, где космический объект на изображении представляется в виде трека на фоне стационарных звезд может быть использование видео данных [1]. Кодирование в один исходный файл видео потока оптических данных как многочисленных реализаций случайного процесса позволяет накопить достаточный объем информации для операций усреднения при решении задачи оптимального обнаружения действующих спутников и космического мусора [2].

В работе представлен метод обнаружения космических объектов оптической системой слежения построением опорных масок на основе Фурье спектра разностного кадра видео последовательности и зависимости этого Фурье спектра от орбитальных параметров космического объекта.

Формирование разностного кадра. Случайный характер интенсивности отраженного оптического потока от поверхности космического объекта не позволяет устанавливать априорные значения этого параметра в качестве порога обнаружения. Из чего следует, что в качестве базиса для извлечения признаков должны быть использованы особенности текстуры или, другими словами, формы сигнала. Как уже упоминалось ранее, одной реализации случайного процесса или одного кадра не всегда достаточно для принятия решения о наличии или отсутствии сигнала. Естественной особенностью космического

объекта в видео последовательности является движение. Чтобы представить движение объекта в виде некоторой ярко выраженной текстуры необходимо использовать разностный кадр. В качестве базиса для извлечения признаков использовались не просто текстуры разностного кадра, а Фурье образы этих текстур. На рисунке 1 представлены примеры анализируемых текстур разностного кадра спутника *AQUA* (NORAD ID: 27424) и их Фурье спектры. Для формирования разностного кадра использовались экспериментальные данные измерений и две стратегии: дифференциация каждого n -го кадра (рисунок 1, *а*) и суммирование каждых n кадров с вычитанием полученных сумм (рисунок 1, *б*).

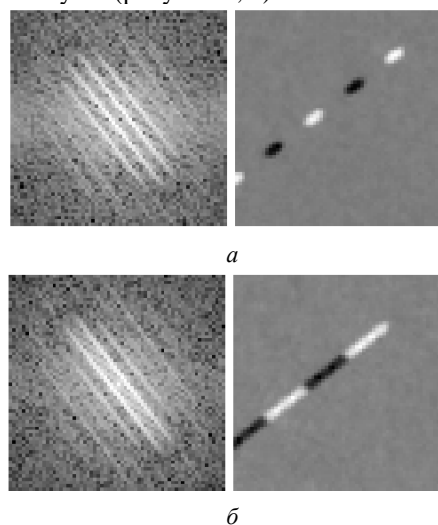


Рисунок 1 – Разностные кадры и их Фурье спектры: *а* – дифференциация 3-го кадра; *б* – суммирование 3-х кадров с вычитанием

Полученные разностные кадры разбиваются на блоки размером 64×64. При дальнейшей обработке рассчитываются Фурье спектры каждого блока. Можно заметить (рисунок 1), что форма сигнала интенсивности спутника на разностных кадрах подобна синусоидальной волне. И чем однороднее пятно интенсивности на каждом вычитаемом кадре, тем ярче выражена частота этой синусоиды на Фурье спектре. Обработка данных оптических измерений космических объектов и оценка различных типов разностных кадров на основе их Фурье спектров показывает, что для формирования такого набора данных, который независимо от чувствительности к условиям съемки и неопределенности входной информации позволил бы определить характерные признаки для решения задачи обнаружения наиболее эффективно использовать вычитание накопленных сумм каждых 3-х кадров (рисунок 1, б).

Метод обнаружения космических объектов.

Задача обнаружения космических объектов может быть решена построением опорных масок на основе Фурье спектра полученного разностного кадра и зависимости этого Фурье спектра от орбитальных параметров космического объекта. Для определения общих характеристик Фурье спектра разностных кадров исследовались видео данные пролетов космических объектов с типами орбит, параметры которых отражены в таблице 1 (r_p – перигей, r_a – апогей, i – наклонение, T – период).

Таблица 1. Орбитальные параметры космических объектов

Спутник	NORAD ID	r_p , км	r_a , км	i , град	T , мин
AQUA	27424	705,1	706,3	98,3	98,7
KORONAS-FOTON	33504	495,6	520,8	82,4	94,6
ОКЕАН 3	21397	573,9	598,8	82,5	96,3
CUSAT 2/FALCON 9	39271	308,5	881,5	80,9	96,4
GENESIS 1	29252	477,9	495,1	64,5	94,2

В точках с близкими угловыми координатами некоторого этапа съемки космические объекты, параметры орбит которых значительно различаются по наклонению или эллиптичности, представляются Фурье спектрами с отличной частотой синусоидального сигнала разностного кадра. С другой стороны, если рассмотреть объекты с похожими параметрами орбиты и сравнить Фурье спектры их разностных кадров, получится, что совпадение по значению скорости движения достигает 95 %. Результаты показывают, что объекты с подобными параметрами орбиты движутся

согласно одинаковым закономерностям изменения скорости и угловых координат и, следовательно, могут быть обнаружены с использованием масок, построенных по одному и тому же образу для некоторых доверительных интервалов угловых координат. Для обнаружения в последовательности видео кадров спутника AQUA использовалась маска, построенная на основе разностного кадра спутника KORONAS FOTON с подобными орбитальными параметрами. На рисунке 2 отражены результаты, которые показывают максимум корреляции между Фурье спектром спутника AQUA и KORONAS FOTON при повороте последнего на разницу угла их ориентации в плоскости кадра, что выполняется автоматически алгоритмом обнаружения. В данном случае, угол поворота составил 19°. Угловые координаты области съемки, где на основе максимума корреляции обнаружен спутник AQUA и спутника построенной маски составили соответственно: прямое восхождение 18h14m17s и 01h23m35s, склонение +31°01'52" и +35°36'14".

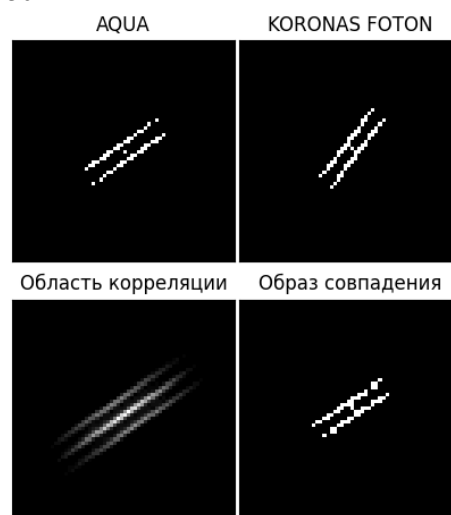


Рисунок 2 – Обнаружение спутника KORONAS FOTON

Литература

1. Video Data Processing System for Ground-Based Space Optical Surveillance Application / V. Baranova [et al.] // Proc. 2023 IEEE 10th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), Milan, Italy, 19–21 June 2023 / IEEE; edited by M. Marracci. – Milan, 2023. – P. 551–555.
2. Using all-sky optical observations for automated orbit determination and prediction for satellites in low Earth orbit / T. Wijnen [et al.] // Proc. 1st NEO and Debris Detection Conference, Darmstadt, Germany, 22–24 January 2019 / ESA Space Safety Programme Office; Ed. T. Flohrer. – Darmstadt, 2019. – P. 437–444.

УДК 621.3.047.3: 621.313.84

ВРАЩАЮЩЕЕСЯ КОНТАКТНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПАНОРАМНОГО ПРИЦЕЛА

Барцевич А.М.¹, Фёдорцев Р.В.², Семчёнок А.В.^{1,2}

¹ОАО «Пеленг»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассмотрена конструкция разработанного вращающегося контактного устройства (ВКУ), позволяющего передавать электрические сигналы с неподвижной части прибора (статор) на подвижную (ротор). Для ведущих частей ВКУ, передающих и принимающих электроэнергию, подобраны материалы с высокой износостойкостью для длительного времени эксплуатации. В результате испытаний было получено, что разработанная модель имеет срок службы в более 2 млн об.

Ключевые слова: вращающееся контактное устройство (ВКУ), передачи силовых и слаботочных сигналов, контактные кольца.

ROTATING CONTACT DEVICE FOR PANORAMIC SIGHTS

Bartsevich A.M.¹, Feodortsau R.V.², Semchenok A.V.^{1,2}

¹JSC "Peleng"

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article considers the design of the developed rotating contact device (RCD), which allows to transfer electrical signals from the stationary part of the device (stator) to the moving part (rotor). For the leading parts of the RCD, transmitting and receiving electric power, materials with high wear resistance for a long time of operation are selected. As a result of tests it was received that the developed model has a service life of more than 2 million revolutions.

Key words: rotating contact device (RCD), power and low-current signal transmissions, slip rings.

Адрес для переписки: Семчёнок А.В., ул. Багратиона, 70, г. Минск, 220037, Республика Беларусь
e-mail: semchenok.a@mail.ru

Вращающееся контактное устройство (ВКУ) относится к вспомогательным приборам электрооборудования бронетанковой техники. В зависимости от функционального назначения ВКУ может быть реализовано для передачи электроэнергии из корпуса машины во вращающуюся башню (сильноточная система) или для аппаратуры обеспечивающую коммутацию сигналов управления между электронными блоками внутри изделия без искажений и взаимных помех (слаботочная система). Конструктивно ВКУ состоит из двух верхнего и нижнего корпусов (алюминиевый сплав), объединенных подшипниковым узлом с манжетным уплотнением, в которых расположены остальные узлы и детали сильноточной и слаботочной систем ВКУ. Нижний неподвижный корпус ВКУ жестко закреплен на днище корпуса боевой машины, верхний подвижный корпус имеет единую ось вращения с башней, которая осуществляется через специальный поводок [1].

Количество компаний, осуществляющих выпуск модельного ряда ВКУ для сильноточных систем достаточно ограничен, ПГ «Батмастер»: ВКУ-27, ВКУ-300-1, ВКУ.330-2, ВКУ-330-4 (для Т-54, Т-55, Т-62, Т-64, Т-72, БМП-1 и 2). Предложена структурно-функциональная схема системы управления огнем боевых машин типа танк, БМП, БТР, БМД и т. п. включающая ВКУ (Патент RU2718186С1). Среди зарубежных производителей, например Huta Stalowa Wola SA (HSW).

Значительно больший объем занимают слаботочные системы ВКУ производства компаний: «MOFLON Technology» (Китай); ВР1000: ВЦ052-5213-001 ООО «АВИ Солюшинс»; ВКУ-23, ВКУ-40 ООО «Ижевский радиозавод»; Инженерный центр «Автоматизированные системы контроля» (Россия).

ОАО «Пеленг» предложен вариант конструкции ВКУ, предназначенный для установки между башней танка и приемным блоком управления боевой машины при вращении в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (по вертикали и горизонтально). ВКУ обеспечивает передачу 12-ти постоянных, переменных и импульсных электрических сигналов (коммутирующих, дифференцирующих, цифровых информационных CAN шины и др.) через интерфейсы и разъемы: RS485, HD-SDI и др. от многоканального оптического прицела в блок управления (рисунок 1).

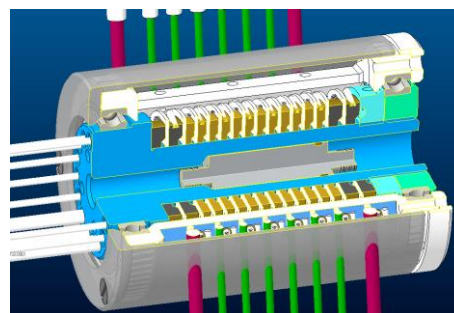


Рисунок 1 – 3D модель ВКУ (с осевым разрезом)

Подключение питания к контактным кольцам производится через плату, непосредственно связанную с внешним корпусом (рисунок 2).

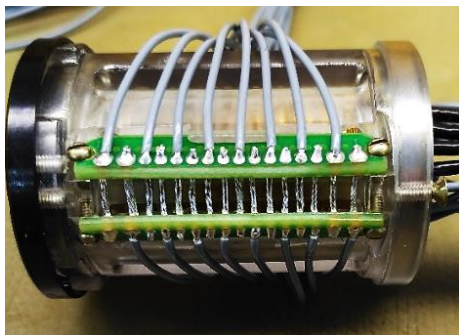


Рисунок 2 – Подключение питания контактных колец

Технические характеристики разработанного ВКУ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики ВКУ

Наименование параметра	Числовое значение
Частоты вращения, об/мин	60
Номинальный ток силовых цепей, А	10
Номинальный ток сигнальных цепей, А	2
Номинальное напряжение, В	27
Габаритные размеры: наружный × внутренний диаметр × высота, мм	35×20×51
Количество токопроводящих колец, шт.	16
Количество рабочих каналов управления	12
Типы сигналов	12 слаботочных, 4 силовых
Силовые линии	ток до 10 А, напряжение до 27 В

Для контактных колец (рисунок 3) и пружин были подобраны материалы и покрытия с низким коэффициентом трения и высокой электропроводностью (таблицы 2 и 3).



Рисунок 3 – Внешний вид половины контактного кольца

Материал контактных колец – латунь свинцовая. Подобран исходя из высоких антифрикционных свойств.

Таблица 2. Материал кольца

Элемент	Ат., %	Вес, %
Cu	61,60	57,38
Zn	35,27	33,84
Pb	2,64	8,02

Покрытие контактного кольца – гальваническое золото. Никель используется как барьерный слой для предотвращения диффузии и растворения золота в меди, так и в качестве легирующей добавки для увеличения износостойкости.

Таблица 3. Материал покрытия

Элемент	Ат., %	Вес, %
Ni	11,97	4,06
Cu	4,75	1,73
Au	83,28	94,21

В результате выбранного материала и покрытия, динамическое напряжение кольцо составляет $\sigma_{\text{дин}} = 12,83$ Па.

В ходе исследований контактных колец после испытаний (300 тыс. оборотов), был проведен анализ поверхности при помощи сканирующего электронного микроскопа MIRA3 LMN (рисунок 4).

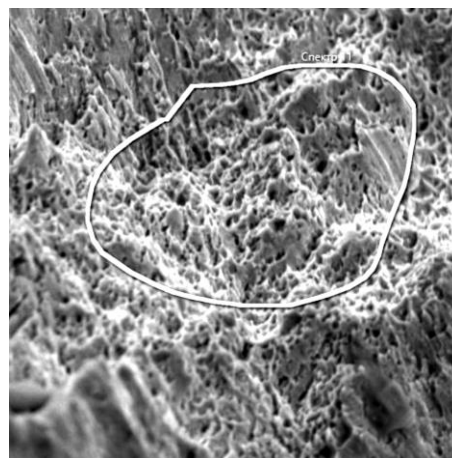


Рисунок 4 – Поверхность контактного кольца

Исходя из анализа поверхностей контактных колец, износостойкость ВКУ составляет более 1,5 млн об.

Литература

1. Барцевич, А.М. Вращающееся контактное устройство для панорамного прицела / А.М. Барцевич, А.В. Семченок, Р.В. Фёдорцев // Материалы 16-ой международ. научно-технич. конфер. молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения». – Минск. – 2023. – С. 177.

УДК 535.417,681.723.26

РАЗРАБОТКА КОМПАКТНОЙ КОНСТРУКЦИИ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО МИКРОСКОПА

Горбач Д.В.¹, Величко К.Г.²¹Белорусский государственный университет,²УО «Национальный детский технопарк»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрена возможность создания портативного голографического микроскопа, перспективного для использования на производстве или в медицине. Для обеспечения компактности и упрощения сборки и настройки оптической системы микроскопа предложено использование готового оптического модуля из пишущего DVD-привода в качестве элемента конструкции. Исследованы основные параметры, от которых зависит качество получаемых интерференционных картин, а также разработан предметный моторизированный столик в качестве системы позиционирования изучаемых объектов.

Ключевые слова: цифровая голографическая микроскопия, интерференция, длина когерентности.

PDEVELOPMENT OF A COMPACT DESIGN OF A HOLOGRAPHIC MICROSCOPE

Gorbach D.V.¹, Velichko K.G.²¹Belarusian State University²EI "National Children's Technopark",

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The possibility of creating a portable holographic microscope, promising for use in production or medicine, is considered. To ensure compactness and simplify the assembly and adjustment of the optical system of the microscope, it is proposed to use a ready-made optical module from a DVD burner drive as a design element. The main parameters on which the quality of the resulting interference patterns depends were studied, and a motorized object table was developed as a system for positioning the objects being studied.

Key words: digital holographic microscopy, interference, coherence length.

Адрес для переписки: Величко К.Г., пр. Черняховского, 11-17, г. Витебск, 210017, Республика Беларусь
e-mail: karyvell.m@gmail.com

Голографическая микроскопия используется для создания фазовых изображений микрообъектов и структуры поверхностей, получение которых основывается на явлении интерференции. Данная методика находит свое применение в различных областях науки и технологии для осуществления неразрушающего контроля биологических объектов и структуры поверхности. Конструкция голографического микроскопа может обходиться практически без линз, что положительным образом влияет на качество получаемых изображений [1]. Их разрешение практически не зависит от световых aberrаций и определяется разрешением CCD-матрицы и качеством получаемых интерференционных картин. По этой причине при конструировании оптической системы голографического микроскопа главными моментами являются геометрические параметры системы, а также стабильность и длина когерентности лазерного излучения.

Интерес представляет создание портативного голографического микроскопа, который возможно использовать вне громоздких лабораторных установок. Компактную конструкцию такого прибора может обеспечить использование оптического модуля из DVD-привода (условная схема представлена на рисунке 1), качество и компактность которых позволяет их использовать для различных научных целей, в том числе голографической микроскопии [2]. Его устройство сходно с

одной из схем получения голограмм на основе интерферометра Майкельсона, когда роль одного из зеркал играет изучаемый образец.

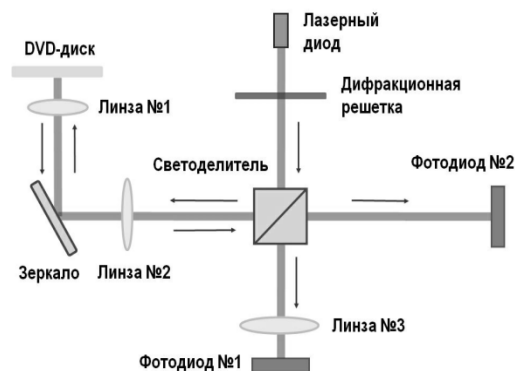


Рисунок 1 – Структурно-функциональная схема оптической части DVD-привода (модель Sony AD7260S)

Для создания оптической системы микроскопа на основе такого модуля необходимо:

1. Демонтировать дифракционную решетку, размещенную перед лазерным диодом.
2. Демонтировать два фотодиода, вместе со стоящими перед ними линзами.
3. На место одного из фотодиодов необходимо установить юстируемое зеркало, на место другого – CCD-матрицу для регистрации интерференции.

4. Заменить в случае необходимости лазерный диод сторонним лазером.

Необходимость замены встроенного лазерного диода определяется длиной когерентности его излучения. Для получения интенсивности картины соответствующей динамическому диапазону камеры может потребоваться ослабление излучения лазера посредством установки световых фильтров. Схема голографического микроскопа, на базе оптического модуля показана на рисунке 2. Размер микроскопа при этом составит порядка 5×7 см. В качестве регистрирующего элемента может быть использована камера мобильного телефона. Обработка полученных изображений осуществляется посредством специализированного программного обеспечения [3].

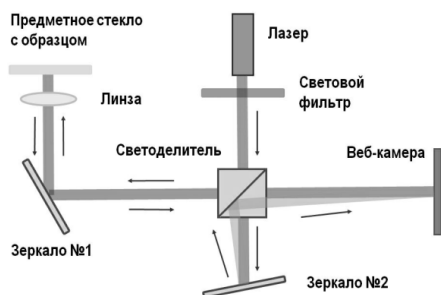


Рисунок 2 – Структурно-функциональная схема голографического микроскопа на основе оптики из DVD-привода

Для экспериментальной проверки собрана оптическая установка, представляющая собой интерферометр Майкельсона, с ПЗС камерой для регистрации. Показано, что качество получаемой интерференционной картины зависит от двух основных параметров: расстояния от первого зеркала до светоделителя и угла наклона второго зеркала. Эти два параметра влияют на четкость интерференционной картины и ширину интерференционных полос соответственно (рисунок 3).

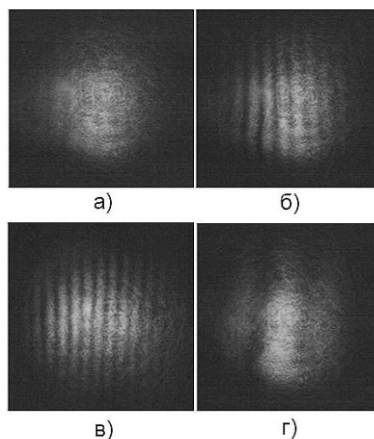


Рисунок 3 – Интерференция лучей в зависимости от положения предметного столика (а и б), от угла между интерферирующими лучами (в и г).

Таким образом, для настройки оптической системы достаточно обеспечить юстировку только одного из зеркал и предметного стекла с образцом.

Для позиционирования образца разработана конструкция предметного столика, позволяющего перемещать образец по трем координатам. Опорные элементы конструкции разработаны в среде моделирования Компас 3D и могут быть изготовлены с помощью 3D печати (рисунок 4).

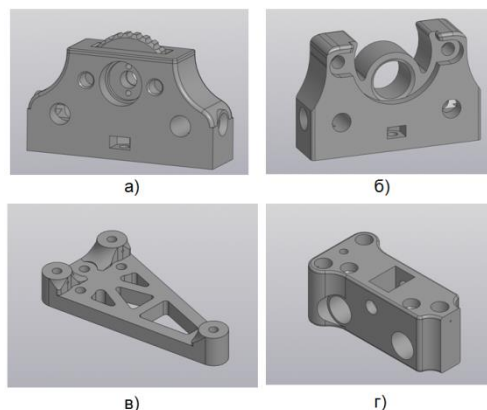


Рисунок 4 – Элементы столика: опоры для направляющих с ручным управлением перемещения (а); с возможностью закрепления мотора (б); предметная платформа с крепежами для держателей для предметного стекла (в); каретка одной из осей (г)

Для полного монтажа конструкции необходимы стандартно производимые оси, заходные винты и шаговые моторы. Оси X и Y столика моторизированы и имеют возможность управления с ПК, положение оси Z настраивается вручную, с помощью винта. Управление шаговыми моторами происходит в программной среде Arduino, разрешение перемещения (при режиме полного шага и угле поворота вала мотора 0,176°/шаг), составляет порядка одного микрона.

Предложенный в работе портативный голографический микроскоп позволит осуществить экспресс контроль биологических объектов или структуры поверхности без использования сложного лабораторного оборудования. Применение предметного столика совместно с предложенным голографическим микроскопом обеспечивает возможность заданного перемещения изучаемого образца по осям X и Y, а также сканирование образца по оси Z.

Литература

1. Stroke, G.W. Lensless Fourier-transform method for optical holography / G.W. Stroke // Appl. Phys. Lett. – 1965. – Vol. 6. – P. 201–203.
2. Hwu, E. Hacking CD/DVD/Blu-ray for Biosensing / E. Hwu, A. Boisen // ACS Sens. – 2018. – Vol. 3, № 7. – P. 1222–1232.
3. Atlan, M. Holovibes: hologram rendering made easy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://holovibes.com>.

УДК 533.9.082, 533.922, 533.924, 621.373.8

ЛАЗЕРНАЯ АТОМНО-ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ БИООБЪЕКТОВ И ПОРИСТЫХ ТЕЛ

Воропай Е.С., Ермалицкая К.Ф., Тризнюк Е.Л.

Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследования проводились на лазерном двухимпульсном атомно-эмиссионном спектрометре ЛАЭМС производства кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ.

Ключевые слова: лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия, лазерная абляция, пористые тела.

LASER ATOMIC EMISSION SPECTROSCOPY OF BIOSAMPLES AND POROUS OBJECTS

Voropay E.S., Ermalitskaia K.F., Triznyuk E.L.

Belarussian State University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The studies were carried out on a laser double-pulse atomic emission spectrometer LAEMS produced by the Department of Laser Physics and Spectroscopy, Faculty of Physics, BSU.

Key words: laser atomic emission spectroscopy, laser ablation, porous objects.

Адрес для переписки: Ермалицкая К.Ф., пр. Независимости, 4, г. Минск, 220030, Республика Беларусь
e-mail: ermalskaia@gmail.com

Лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия (англ. – laser induced breakdown spectroscopy – LIBS) на протяжении последних десятилетий является одним из наиболее распространенных и эффективных методов малодеструктивного элементного анализа. Широкое распространение данного подхода связано с высокой чувствительностью – возможного определения тысячных и десятичных долей процента, малыми количествами вещества, необходимыми для анализа – 10^{-10} г, отсутствием требований к состоянию поверхности, высокая скорость исследования, малый размер кратера (100 мкм), возможность проведения послойного сканирования. Актуальность данного исследования связана с доступностью огромного количества БАДов, витаминных комплексов, которые распространяются через онлайн магазины, а не через аптечную сеть, в которой обязательна сертификация лекарственных средств.

Целью данной работы – было исследование возможностей применения лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии для малодеструктивного определения микроэлементов в образцах таблетированных витаминов и рисовых зерен, подвергшихся замачиванию в растворах таблетированных витаминов.

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 $f_{л} = 10$ Гц и длиной волны $\lambda = 1064$ нм;

– длительность импульсов $\tau_{л} \approx 10$ нс;

– межимпульсный интервал $\Delta t = 0-100$ мкс (шаг 1 мкс);

– диапазон анализируемых длин волн $\Delta\lambda = 260-760$ нм;

– энергия лазерного импульса $E_{имп} = 10-100$ 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 сдвоенных 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 сдвоенным 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 сдвоенных лазерных импульсов и частоту их следования;

– программное обеспечение позволяет перемещать предметный столик с закрепленным образцом в двух плоскостях (вверх-вниз, влево-вправо). Режим «микроскоп» в совокупности со светодиодной подсветкой и прицельным лазером позволяет точно определить метод воздействия лазерного излучения на образец, что является необходимым при исследовании готовых промышленных изделий, предметов искусства и артефактов, ювелирных изделий, образцов, размеры которых не превышают нескольких мм.

Объекты исследования. В работе использовались образцы металлов: магний, железо, цинк.

Образцы таблетированных микроэлементных комплексов: Магнефар В6 (действующие вещества: магния гидроаспарагината тетрагидрат 500 мг, что соответствует 34 мг ионов магния, пиридоксина гидрохлорид (витамин В6) 5 мг), Ферретаб комп (действующие вещества: железа фумарат 152,1 мг, фолиевая кислота 0,5 мг), Цинк + Витамин С (действующие вещества: цинк, не менее 12 мг, витамин С, не менее 90 мг).

Рисовые зерна, подверженные замачиванию в растворах таблетированных микроэлементных комплексах. Для приготовления растворов из каждого таблетированного витаминного комплекса были взяты по 4 таблетки и измельчены. Получившиеся порошки были смешены с водой. Растворы получились высококонцентрированными с выпавшим осадком. В полученных растворах рисовые зерна пролежали 25 часов. Высушенные рисовые зерна поменяли цвет, что свидетельствует о том, что рисовые зерна впитали в себя компоненты таблетированных витаминных комплексов.)

Лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия биообъектов и пористых тел. Экспериментально были определены оптимальные значения временного интервала между сдвоенными лазерными импульсами, обеспечивающие максимальное увеличение аналитического сигнала за счет дополнительного возбуждения первичной абляционной плазмы излучением второго импульса. Полученные значения меж импульсных интервалов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Оптимальные значения меж импульсного интервала, обеспечивающие максимальный аналитический сигнал

	Металл	Таблетка	Рис
Магний	8	4	1
Железо	12	5	1
Цинк	10	4	1

Обнаруженные различия в значениях меж импульсного интервала связана с различной плотностью первичной абляционной плазмы, вступающей во взаимодействие со вторым импульсом из сдвоенных. Так для металлов испаряется много вещества, плотность плазмы будет определяться термодинамическими параметрами самого вещества, в то время как при абляции биообъектов и пористых тел плотность плазмы будет зависеть от характеристик неметаллической матрицы, поэтому для риса временной интервал одинаков во всех случаях. Фрагменты спектров чистого магния, таблетированного магния (б), а также риса, обработанного раствором магния (в), приведены на рисунке 1.

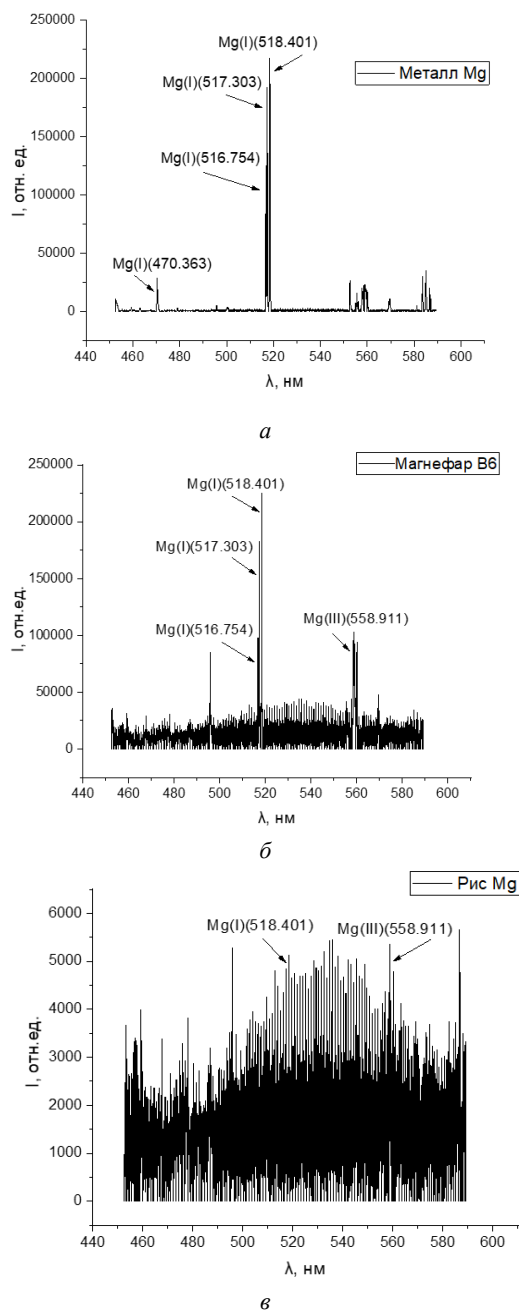


Рисунок 1 – Фрагменты спектров чистого магния (а), таблетированного магния (б), а также риса, обработанного раствором магния (в)

Таким образом, исходя из представленных результатов можно сделать вывод, что лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия эффективна не только при проведении элементного анализа изделий из металлов и сплавов, но также пористых образцов и биообъектов, содержание микроэлементов в которых не превышает долей процента.

УДК 621.327

ИМПУЛЬСНАЯ КОРОТКОДУГОВАЯ ТРЕХЭЛЕКТРОДНАЯ ГАЗОРАЗРЯДНАЯ ЛАМПА ДЛЯ ОПТИКОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ УФ-ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ

Гавриш С.В., Потапенко А.О., Шашковский С.Г.

ООО «Научно производственное предприятие «Мелитта»
Москва, Зеленоград, Российская Федерация

Аннотация. Работа посвящена рассмотрению первых результатов по созданию импульсного источника УФ-излучения на основе короткодугового ксенонового разряда высокого давления, зажигаемого посредством вспомогательного электрода. Описана конструкция газоразрядной лампы, рассмотрены особенности ее работы в разрядном контуре, установлена временная зависимость яркости разряда в УФ и видимом диапазонах спектра в зависимости от тока разряда.

Ключевые слова: короткодуговая лампа, основной электрод, электрод зажигания, УФ излучение, плазменный канал, яркостная температура, разрядный ток, высоковольтное напряжение, разрядный контур.

PULSED SHORT-ARC THREE-ELECTRODE GAS-DISCHARGE LAMP FOR OPTOELECTRONIC UV-DISINFECTION SYSTEMS Gavrish S.V., Kireev S.G., Potapenko A.O., Shashkovskiy S.G.

Scientific and Production Enterprise "Melitta", Ltd,
Moscow, Zelenograd, Russian Federation

Abstract. The work is dedicated to the considering of the first results of creation pulsed source of UV-radiation on the base of short-arc xenon high pressure discharge, ignited by an auxiliary electrode. The design of gas-discharge lamp was described, features of it operating in discharge circuit were considered, time dependance of the discharge brightness in UV and VIS spectral range on discharge current was established.

Key words: short-arc lamp, main electrode, auxiliary electrode, UV-radiation, plasma channel, brightness temperature, discharge current, high voltage, discharge circuit.

Адрес для переписки: Гавриш С.В., ул. Миклухо-Маклая, 16/10, г. Москва, 117997, Российская Федерация
e-mail: svgavr@list.ru

За последние годы импульсный ксеноновый разряд доказал свою эффективность в качестве источника УФ излучения в оптикоэлектронных системах (ОЭС) обеззараживания воздуха и поверхностей [1]. В указанных ОЭС в основном применяются импульсные трубчатые лампы с различной конфигурацией плазменного канала (прямой, U-образный и т. д.). В силу агрессивного воздействия ксеноновой плазмы на внутреннюю поверхность разрядной трубки неизбежно происходят процессы деградации ограничивающей разряд кварцевой оболочки (кристаллизация, изменение цветности и т. д.), что снижает срок службы газоразрядной лампы. Исключить данный недостаток позволяет использование неограниченного разряда в импульсной лампе, представляющей собой шаровую кварцевую колбу с герметично установленными в ней электродными узлами на малом (4–8 мм) удалении рабочих поверхностей катода и анода друг от друга (рисунок 1). Такая конструкция дает возможность существенно удалить плазменный канал от стенки кварцевой оболочки. Важной особенностью рассматриваемого источника УФ-излучения является наличие в середине разрядного промежутка дополнительного электрода зажигания, позволяющего производить надежную инициализацию разряда и сократить потери энергии разряда за счет исключения из цепи питания газоразрядной лампы последовательно соединенного устройства поджига.

Целью данной работы является определение спектрально – энергетических преимуществ предложенного технического решения короткодуговой лампы (КДЛ) в сравнении с другими источниками УФ излучения.

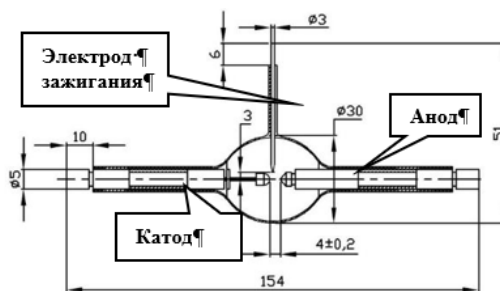


Рисунок 1 – Конструкция исследуемой трехэлектродной ксеноновой лампы

Методика испытаний. Исследования КДЛ проводились при ее работе в разрядном контуре с емкостью накопительного конденсатора 3,2 мкФ и регулируемым напряжением U_0 в диапазоне от 0,5 до 3 кВ. Давление ксенона в разрядном объеме двух исследуемых ламп составляло 4 и 6 атм., поэтому напряжение самопробоя составляло более 6 кВ. КДЛ испытывалась в режиме одиночных импульсов. Пробой разрядного промежутка производился подачей импульса напряжения на вспомогательный электрод от высоковольтного трансформатора. Регистрация электрических параметров

ров исследуемой лампы и разрядного контура производилась при помощи пояса Роговского и высокоточного делителя напряжения. Для изучения характеристик излучения в видимом и УФ диапазонах применялся измерительный комплекс «Спектр-01».

Электрические параметры и характеристики УФ излучения КДЛ. На рисунке 2 представлены полученные осциллограммы тока и напряжения исследуемых образцов газоразрядных ламп.

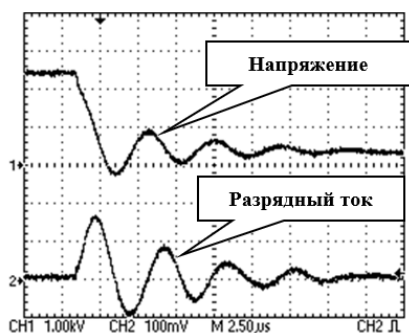


Рисунок 2 – Осциллограммы падения напряжения и разрядного тока лампы. $U_0 = 2,5$ кВ

Из представленных данных видно, что ток ксенонового разряда имеет четыре ярко выраженных периода колебаний с логарифмическим декрементом затухания:

$$D = \ln I_i / I_{i+2} \approx \ln I_{i+1} / I_{i+3} \approx 0,74,$$

где I_i – амплитуда импульса тока на каждой полуwave. Из осциллограм на рисунке 2 следует, что длительность первого полупериода импульса тока составляет $\tau_1 \approx 2,69$ мкс, в то время как для остальных полуwave это время равно 2,15 мкс. Это явление связано с прогревом плазменного канала после пробоя «холодной» лампы.

В ходе выполненных нами исследований установлено, что сопротивление разрядного контура, соответствующее рассчитанному выше декременту затухания, при напряжении на накопительном конденсаторе 2,5 кВ составляет $R_{эфф.} = 0,08$ Ом. Таким образом, параметр затухания импульсов тока γ в исследуемом разрядном контуре составляет $\gamma = R_{эфф.} / (2Z) \sim 0,117$, где $Z = (L/C)^{0,5} \sim 0,34$ Ом – волновое сопротивление электрической цепи питания лампы. Учитывая, что по нашим оценкам сопротивление электродных узлов составляет не более 4 % от общего сопротивления лампы, то можно сделать заключение о практически полном рассеивании в ксеноновой плазме подводимой к газоразрядной лампе электрической мощности.

На рисунке 3 показана временная зависимость тока и яркостной температуры в УФ и видимой областях спектра. Как следует из представленных данных, максимальная яркость разряда наблюдается через 0,2–0,3 мкс после достижения током экстремума. Такое явление связано с высокой скоростью поступления энергии в разряд, когда ее потери происходят исключительно за счет теплопроводности, а не излучения.

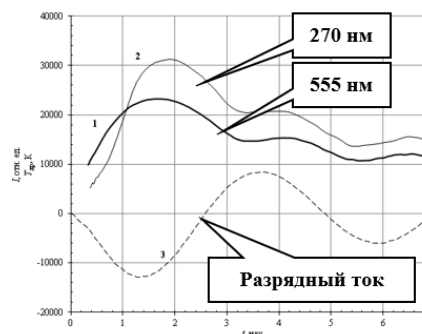


Рисунок 3 – Временные зависимости яркостных температур излучения на длине волны 270 нм (1) и 555 нм (2) спектра, синхронизированные с разрядным током (3), при $U_0 = 2,5$ кВ

Важным результатом, который следует из рисунка 3, является расхождение во временных кривых яркости для длины волны 270 и 555 нм, что свидетельствует об отклонении спектра излучения от распределения Планка. При этом в видимом диапазоне происходит насыщение яркостной температуры. В то же время, в синей области спектра такого явления не наблюдается, что раскрывает перспективы повышения эффективности излучения короткодугового разряда высокого давления в УФ диапазоне путем увеличения электрической мощности лампы.

По нашим оценкам предлагаемый конструктивный вариант короткодуговой импульсной ксеноновой лампы может обеспечить мощность излучения в УФ диапазоне до 50–60 % от всей мощности, испускаемой плазменным каналом при достижении яркостной температуры до значений 22000 К. Представленные первые результаты по изучению некоторых характеристик короткодугового разряда позволяют рассматривать трехэлектродную ксеноновую лампу как перспективный высокояркостный источник излучения в УФ диапазоне спектра для оптоэлектронных систем различного назначения (медицина, фотолитография и т. д.)

Литература

1. Вирулицидная активность импульсного ультрафиолетового излучения сплошного спектра в отношении коронавируса SARS-CoV-2 / А.Ю. Зверев [и др.] // Медицинский алфавит. – 2020. – № 18. – С. 55–58.

УДК 621.373.826

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО КВАНТРОНА С ПОПЕРЕЧНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ АКТИВНОЙ СРЕДЫ Nd³⁺:YAG

Галюк К.А., Овчаренко Б.Д., Букин В.В., Ушаков А.А.

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук
Москва, Российская Федерация*

Аннотация. На основе непоследовательной трассировки лучей в программе Zemax разработана математическая модель квантрона с поперечной диодной накачкой активной среды (АС) Nd³⁺:YAG. Рассчитаны распределение мощности поглощенного излучения накачки по поперечному сечению АС и эффективность поглощения излучения накачки. Проведена оптимизация конструкции квантрона, направленная на увеличение эффективности поглощения излучения накачки в АС. На основе экспериментально измеренной зависимости коэффициента усиления слабого сигнала от времени и временной зависимости тока накачки источников излучения разработана численная модель коэффициента усиления АС.

Ключевые слова: квантрон, эффективность поглощения, коэффициент усиления.

MODELING OF A SOLID-STATE QUANTRON WITH TRANSVERSE DIODE PUMPING IN AN Nd³⁺:YAG ACTIVE MEDIUM

Galyuk K., Ovcharenko B., Bukin V., Ushakov A.

*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
Moscow, Russian Federation*

Abstract. Based on non-sequential beam tracing in the Zemax program, a mathematical model of a quantron with transverse diode pumping of the Nd³⁺:YAG active medium (AM) has been developed. The power distribution of the absorbed pump radiation over the AM cross section and the absorption efficiency of pump radiation are calculated. The quantron design was optimized, aimed at increasing the absorption efficiency of pump radiation in the AM. Based on the experimentally measured gain dependence of a weak signal on time and the time dependence of the radiation sources pump current, a numerical model of the AM gain is calculated.

Key words: quantron, absorption efficiency, gain.

*Адрес для переписки: Галюк К.А., ул. Вавилова, 38, г. Москва 119333, Российская Федерация
e-mail: karina272001@yandex.ru*

Введение. Твердотельные квантроны с поперечной диодной накачкой АС широко используются во многих областях науки и техники. Важными параметрами квантрона являются распределение мощности поглощенного излучения накачки по поперечному сечению АС, эффективность поглощения излучения накачки (отношение мощности поглощенного излучения накачки в АС к мощности излучения накачки), запасенная энергия в АС и коэффициент усиления. Создание математической и численной моделей квантрона позволяет оптимизировать конструкцию квантрона с улучшенными и необходимыми параметрами, а также проектировать динамические модели накачки АЭ со сложной циклограммой работы. Моделирование квантрона возможно проводить в программе Zemax методом непоследовательной трассировки лучей. В данной работе представлены результаты исследований, направленные на определение параметров и оптимизацию конструкции разработанной модели квантрона с поперечной диодной накачкой АС (кристалла Nd³⁺:YAG с 1 % концентрацией активных центров Nd³⁺). Целью работы является повышение эффективности и создание численной модели квантрона с поперечной диодной накачкой.

Математическая модель квантрона. В качестве исходной конструкции используется

квантрон [1], разрабатываемый и применяемый в ИОФ РАН, с источниками диодной накачки в виде лазерных диодных решеток (ЛДР) производства НПО «Инжент». Для создания в программе Zemax математической модели ЛДР рассчитана численная модель ЛДР и определены характеристики излучения (углы расходимости) с помощью экспериментально измеренного пространственного распределения интенсивности пятна излучения ЛДР, а также метода наименьших квадратов и найденной модельной функции (однозначной связи функции интенсивности $I(x, y)$, зависящей от координат, с функцией интенсивности $I(\theta(x), \theta(y))$, зависящей от углов):

$$I(x, y) = f(\theta[x], \theta[y]) e^{-2\left(\frac{\theta[x]^2}{\alpha^2} + \frac{\theta[y]^2}{\beta^2}\right)}, \quad (1)$$

$$f(\theta[x], \theta[y]) = A \frac{\text{Cos}(\theta[x])\text{Cos}(\theta[y])}{\sqrt{x^2 + m^2}\sqrt{y^2 + m^2}}, \quad (2)$$

где α и β – углы расходимости XZ и YZ соответственно, $\theta[x]$ и $\theta[y]$ – углы наклона луча, m – расстояние от источника до экрана.

Создана модель ЛДР, которая содержит в себе рассчитанные угловые параметры излучения по быстрой и медленной осям, а также экспериментально измеренное спектральное распределение

плотности мощности излучения ЛДР. Для моделирования процесса поглощения излучения накачки в АС используется справочные данные спектрального распределения поглощения $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$.

С помощью созданной математической модели квантрона получены распределения мощности поглощенного излучения накачки по поперечному сечению АС (рисунок 1).

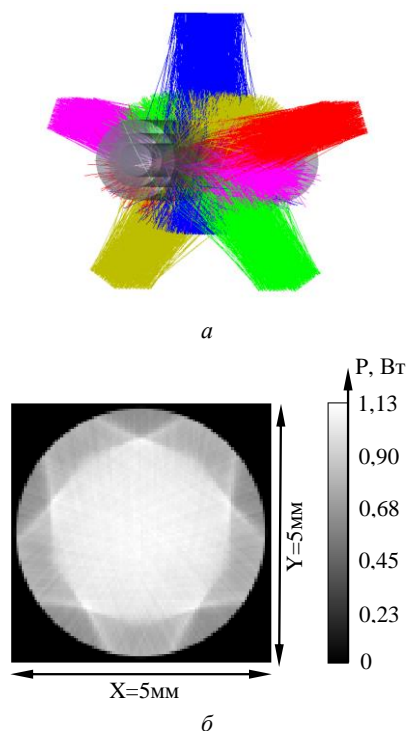


Рисунок 1 – Модель пятилучевой накачки $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ (Zemax): *a* – 3D модель; *б* – распределение поглощенной мощности излучения накачки по поперечному сечению $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$

Проведена оптимизация конструкции квантрона, которая заключалась в изменении расстояния между ЛДР и центром АС, толщины и

диаметра трубки протока охлаждающей жидкости, добавлении различных конфигураций отражателей непоглощенного излучения накачки в АС и систем цилиндрических линз, фокусирующих излучение ЛДР. Найдена функция, описывающая влияние погрешности установки АС (смещения и поворота АС относительно центральной оси квантрона) на эффективность поглощения излучения накачки. На основе полученных результатов разработано несколько макетов квантрона с эффективностью поглощения в $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ примерно на 20 % выше, чем у изделий исходной конструкции.

Коэффициент усиления. Проведен эксперимент с квантроном, работающим в режиме усиления, по измерению временной формы коэффициента усиления слабого сигнала при различных амплитудах тока накачки ЛДР. С помощью временных зависимостей тока накачки и измеренного коэффициента усиления построена численная модель коэффициента усиления для режимов усиления и свободной генерации при различных значениях амплитуды тока накачки.

Порог генерации. Проведен эксперимент с квантроном, работающим в режиме свободной генерации, по измерению энергии и временной формы мощности лазерного излучения. Рассчитана временная зависимость коэффициента усиления с помощью численной модели и экспериментальной зависимости тока накачки ЛДР от времени. По полученным экспериментальной и расчетной зависимостям найдены соответствующие пороги генерации – моменты времени начала генерации лазерного излучения: при различных амплитудах тока накачки ЛДР.

Литература

1. Оптическая усилительная головка с диодной накачкой (варианты): патент RU 2597941 / А.А. Абышев, Ю.Д. Арапов, А.А. Гладилин. – Оpubл. 20.09.2016.

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 БНТУ

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.I., Shishko T.A., Yasukevich A.S., Gorbachenya K.N., Kisel V.E., Kuleshov N.V.

Center for Optical Materials and Technologies of BNTU

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 г. [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 $\text{Pr}:\text{YAlO}_3$) 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 a , 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

производилось. 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 c (π – поляризация), что обеспечивало максимальное поглощение излучение накачки в кристалле. Линза 5 формировала перетяжку диаметром ~ 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.

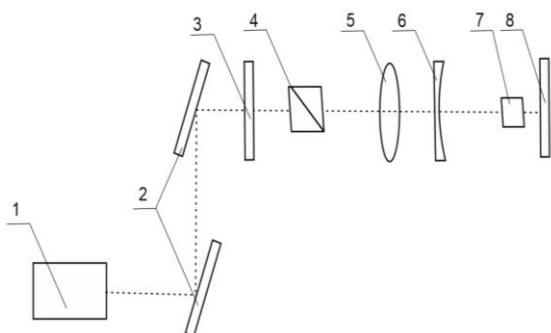


Рисунок 1 – Схема лазера на основе кристалла Pr:YLF:
 1 – оптически накачиваемый полупроводниковый лазер;
 2 – зеркала заводные; 3 – фазовая пластинка $\lambda/2$;
 4 – поляризатор; 5 – линза фокусирующая;
 6 – входное зеркало; 7 – активный элемент Pr:YLF;
 8 – выходное зеркало

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.

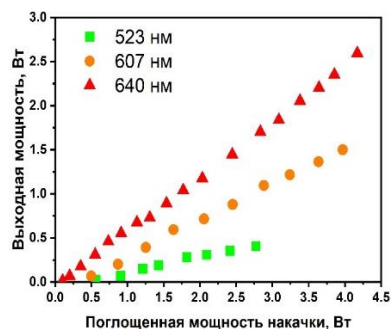


Рисунок 2 – Зависимость выходной мощности лазера на основе кристалла Pr:YLF от поглощенной мощности накачки

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.

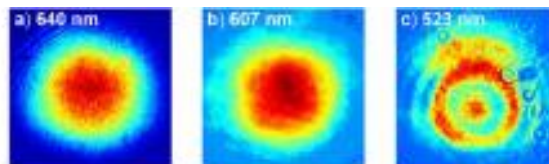


Рисунок 3 – Пространственные профили пучка лазера

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. – 2010. – № 10. – P. 548.
3. Diode-pumped Pr:YAP lasers / M Fibrich [et al.] // Las. Phys. Lett. – 2011. – № 8. – P. 559–568.

UDC 621.3.038.825.2

Er,Yb:ReGa₃(BO₃)₄ (Re = Y, Gd) LASER CRYSTALS**Maltsev V.V.¹, Volkova E.A.¹, Koporulina E.V.¹, Mitina D.D.¹, Kosorukov V.L.¹,
Jiliaeva A.I.¹, Naprasnikov D.A.¹, Gorbachenya K.N.², Kisel V.E.²**¹*Department of Crystallography and Crystal Chemistry, Faculty of Geology, Moscow State University
Moscow, Russian Federation*²*Center for Optical Materials and Technologies of BNTU
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Phase relationships in the $Er_xYb_yY_{1-x-y}Ga_3(BO_3)_4-Bi_2O_3-B_2O_3-(Y,Er,Yb)_2O_3-Ga_2O_3$ and $Er_xYb_yGd_{1-x-y}Ga_3(BO_3)_4-Bi_2O_3-B_2O_3-(Gd,Er,Yb)_2O_3-Ga_2O_3$ ($x = 0.02, y = 0.11$ at.%) system were studied in the temperature range from 1000 to 900 °C. Multicomponent melt $Bi_2O_3-Ga_2O_3-B_2O_3-(Y,Gd)_2O_3$ were used as reasonable fluxes for high-temperature solution growth of $Er_xYb_yR_{1-x-y}Ga_3(BO_3)_4$ ($R = Y, Gd$) spontaneous crystals. The segregation coefficients of Yb and Er impurities in the obtained crystals are determined. The unit cell parameters for the grown crystals were studied, also showing the micromorphology characteristics of the crystals. The luminescence kinetics were investigated, and the lifetimes of the $^4I_{13/2}$ energy level of Er^{3+} ions for Er,Yb:ReGa₃(BO₃)₄ crystals were determined.

Key words: erbium; ytterbium; gallium borate; growth; luminescence kinetics.

ЛАЗЕРНЫЕ КРИСТАЛЛЫ Er,Yb:ReGa₃(BO₃)₄ (Re = Y, Gd)**Мальцев В.В.¹, Волкова Е.А.¹, Копорулина Е.В.¹, Митина Д.Д.¹, Косоруков В.Л.¹,
Жилиева А.И.¹, Напрасников Д.А.¹, Горбаченя К.Н.¹, Кисель В.Э.²**¹*Кафедра кристаллографии и кристаллохимии, геологический факультет МГУ
Москва, Российская Федерация;*²*НИЦ оптических материалов и технологий БНТУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Изучены фазовые соотношения в системах $Er_xYb_yY_{1-x-y}Ga_3(BO_3)_4-Bi_2O_3-B_2O_3-(Y,Er,Yb)_2O_3-Ga_2O_3$ и $Er_xYb_yGd_{1-x-y}Ga_3(BO_3)_4-Bi_2O_3-B_2O_3-(Gd,Er,Yb)_2O_3-Ga_2O_3$ ($x = 0,02, y = 0,11$ ат.%) в температурном диапазоне 1000-900°C. Выращивание спонтанных кристаллов $Er_xYb_yR_{1-x-y}Ga_3(BO_3)_4$ ($R = Y, Gd$) из высокотемпературного раствора-расплава проводилось с использованием сложного растворителя состава $Bi_2O_3-Ga_2O_3-B_2O_3-(Y,Gd)_2O_3$. Определены коэффициенты распределения ионов Yb и Er, оценены параметры кристаллической решетки, а также определены морфологические особенности полученных кристаллов. Исследованы кинетики затухания люминесценции и определены времена жизни уровня $^4I_{13/2}$ ионов Er^{3+} в кристаллах Er,Yb:ReGa₃(BO₃)₄.

Ключевые слова: эрбий, иттербий, кристалл галлиевого бората, рост, кинетики люминесценции.

*Address for correspondence: K.N. Gorbachenya, 65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220113, Republic of Belarus
e-mail: gorby@bntu.by*

A great attention to $RM_3(BO_3)_4$ orthoborate crystals co-doped with Er and Yb is associated with their potential as efficient active media solid-state lasers emitting in the spectral range 1.5–1.6 μm . Due to high phonon frequencies (more than 1000 cm^{-1}) efficient energy transfer from Yb to Er ions take place in these crystals that is one of the crucial conditions for efficient laser action in Er-Yb co-doped materials. The lasers sources in this spectral range are of high interest due to specific features of this radiation. First of all, laser emission in this spectral range is eye-safe since it is absorbed by cornea and does not reach retina. Secondly, it has low losses in atmosphere and quartz fibers, and thirdly, room temperature sensitive detectors exist in this spectral range. The use of diode-laser pumping with high brightness and efficiency and long lifetime gives opportunities for the development of compact laser sources with unprecedented out parameters in different modes of operation for practical applications. Mode-locked lasers

emitting in the spectral range 1.5–1.6 μm with high repetition rate are especially useful as pulse generators for high bit rate optical networks.

Most of these studies were focused on the rare earth aluminum borates $YAl_3(BO_3)_4$ and $GdAl_3(BO_3)_4$, methods for growing single crystals and studying their spectroscopic and laser properties, for example [1; 2]. One of the present work tasks is synthesis of the $YGa_3(BO_3)_4$ and $GdGa_3(BO_3)_4$ borates co-doped with Er and Yb ions and investigation of their compositional and optical properties. In contrast to the above borates, orthoborates with gallium $ReGa_3(BO_3)_4$ have been studied relatively little.

For crystal growth process a vertical resistance-heated furnace equipped with a Proterm-100 precision temperature controller and a set of Pt/Rh-Pt - thermocouples was used. A Pt crucibles of 15 ml volume was used in the growth experiments. For the melt crystallization solution $Er_xYb_yY_{1-x-y}Ga_3(BO_3)_4$: ($Bi_2O_3 - B_2O_3 - R_2O_3 - Ga_2O_3$), the following reagents

were used: R_2O_3 ($R = Y, Gd, Yb, Er$) (99.996 %), Ga_2O_3 , Bi_2O_3 , B_2O_3 (all A.C.S. grade). The size of the isometric or slightly elongated crystals formed is about 2–3 mm (Figure 1). The crystals are transparent and have a typical for the huntite-type habit.

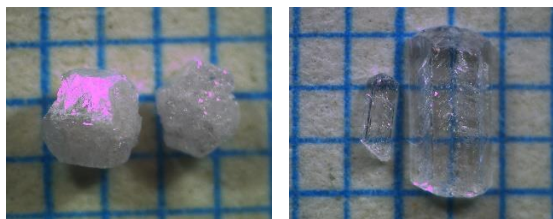


Figure 1 – The $YGa_3(BO_3)_4$ and $GdGa_3(BO_3)_4$ single crystals

The morphological features and elemental analysis were studied by analytical scanning electron microscopy (SEM) technique using JSM-5300 + Link ISIS. Microprobe analysis of unpolishing samples was performed within the accuracy of 0.2–0.3 wt.% using a Cameca analyzer. The micromorphology of the crystal faces is shown in Figure 2. The unusual structure as the characteristic small cracks on the edges of the crystal, are probably associated with the entry of Bi into the YGB structure in an amount of up to 3.5 wt.%.

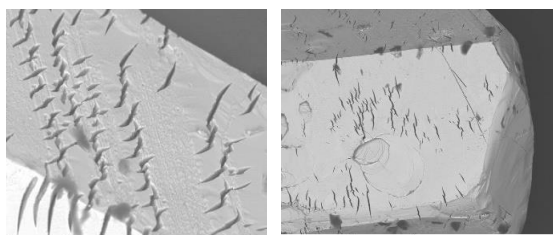


Figure 2 – Micromorphology of the $YGa_3(BO_3)_4$ and $GdGa_3(BO_3)_4$ crystal faces

For the $Er_xYb_yY_{1-x-y}Ga_3(BO_3)_4$ and $Er_xYb_yGd_{1-x-y}Ga_3(BO_3)_4$ ($x = 0.02, y = 0.11$ at.%) crystals, the real impurity segregation coefficients were for yttrium-gallium orthoborate are $K_{SEr} = 1.0, K_{SYb} = 0.72$ for the composition-averaged formula $Er_{0.02}Yb_{0.08}Y_{0.89}Ga_3(BO_3)_4$ and, respectively, for gadolinium-gallium orthoborate $K_{SEr} = 3.0, K_{SYb} = 1.45$ for the composition-averaged formula $Er_{0.06}Yb_{0.16}Gd_{0.78}Ga_3(BO_3)_4$.

Powder X-ray diffraction (PXRD) studies were carried out on a Rigaku MiniFlex-600 powder diffractometer (Rigaku Corp., Japan). PXRD datasets were collected in continuous mode at room temperature ($CuK\alpha$ radiation) in the range of $2\theta = 3-90^\circ$, scan speed of 4° per minute. Phase identification was performed using the ICSD database. Unit cell parameters

of $ReGa_3(BO_3)_4$ single crystals obtained by least-squares refinement are as follows $a = b = 9.4367(5)$ Å, $c = 7.4343(5)$ Å, $V = 573.34$ Å³ for $Er_{0.02}Yb_{0.08}Y_{0.89}Ga_3(BO_3)_4$ and $a = b = 9.4568(3)$ Å, $c = 7.4569(4)$ Å, $V = 577.54$ Å³ for $Er_{0.06}Yb_{0.16}Y_{0.78}Ga_3(BO_3)_4$.

The lifetime measurements were performed using the optical parametric oscillator based on a β - $Ba_2B_2O_4$ crystal and pumped by the third harmonic of the Q-switched Nd:YAG laser. The fluorescence from the sample was collected on the entrance slit of the monochromator MDR-12 and registered by the InGaAs photodiode with preamplifier coupled with a 500 MHz digital oscilloscope.

The decay curves of 1.5 μ m emission ($^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ transition of Er^{3+} ions) were single exponential (Figure 3) for both crystals, and the luminescence decay times of the $^4I_{13/2}$ energy level of Er^{3+} were measured to be about 480 ± 20 μ s and 450 ± 20 μ s for $Er, Yb: YGa_3(BO_3)_4$ and $Er, Yb: GdGa_3(BO_3)_4$ crystals, respectively. The obtained values are close to those presented before for $Er, Yb: ReAl_3(BO_3)_4$ crystals.

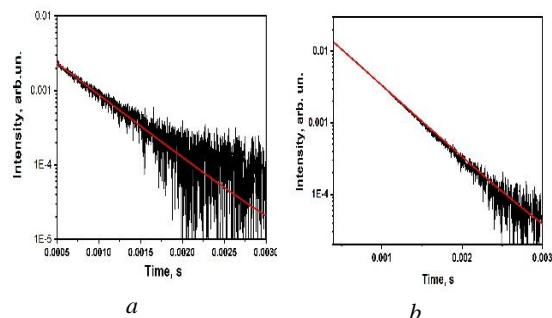


Figure 3 – Kinetics of luminescence decay of $Er, Yb: YGa_3(BO_3)_4$ (a) and $Er, Yb: GdGa_3(BO_3)_4$ (b) crystals

The phase relations in this temperature range for the systems $Er_xYb_yY_{1-x-y}Ga_3(BO_3)_4-Bi_2O_3-B_2O_3-(Y, Er, Yb)_2O_3-Ga_2O_3$ and $Er_xYb_yGd_{1-x-y}Ga_3(BO_3)_4-Bi_2O_3-B_2O_3-(Gd, Er, Yb)_2O_3-Ga_2O_3$ ($x = 0.02, y = 0.11$ at.%) were studied. The lifetimes of $^4I_{13/2}$ energy level were measured for $Er, Yb: YGa_3(BO_3)_4$ and $Er, Yb: GdGa_3(BO_3)_4$ crystals.

This research was supported in part by the BRFFR project № F23RNFM-046.

References

1. Passively Q-switched microchip $(Er, Yb): YAl_3(BO_3)_4$ diode-pumped laser / V.E. Kisel [et al.] // Optics Letters. – 2012. – Vol. 37, № 13. – P. 2745–2747.
2. Q-switched $Er, Yb: GdAl_3(BO_3)_4$ laser with single-walled carbon nanotube based saturable absorber / K. Gorbachenya [et al.] // Laser Physics Letters. – 2017. – Vol. 14, № 3, art. 035802.

УДК 621.3.038.825.2

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛОВ $\text{Yb}^{3+}:\text{Gd}_{1-x}\text{Y}_x\text{VO}_4$
В РЕЖИМЕ СИНХРОНИЗАЦИИ МОД НА КЕРРОВСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ**

Лазарчук А.И., Горбаченя К.Н., Кисель В.Э.

*НИЦ оптических материалов и технологий БНТУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе сообщается о реализации режима пассивной синхронизации мод на основе Керровской нелинейности при использовании кристалла гадолиний-иттриевого ванадата, легированного ионами иттербия $\text{Yb}^{3+}:\text{GdYVO}_4$. Проведено исследование генерационных характеристик: максимальная выходная мощность составила 20 мВт на центральной длине волны генерации 1020 нм, длительность лазерных импульсов составила 120 фс на частоте следования 87 МГц. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности кристаллов гадолиний-иттриевого ванадата, легированного ионами иттербия, для применения в качестве активных сред лазеров с диодной накачкой, генерирующих сверхкороткие импульсы в области около 1 мкм.

Ключевые слова: иттербий, ванадат, генерационные свойства, синхронизация мод.

LASER CHARACTERISTICS OF $\text{Yb}^{3+}:\text{Gd}_{1-x}\text{Y}_x\text{VO}_4$ CRYSTAL IN KERR-LENS MODE-LOCKING

A.I. Lasarchuk, K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel

*Center for Optical Materials and Technologies BNTU Minsk
Republic of Belarus*

Abstract. The paper reports on the realization of a Kerr-lens mode-locking using an yttrium-gadolinium vanadate crystal doped with ytterbium ions $\text{Yb}^{3+}:\text{GdYVO}_4$. The laser output characteristics were studied: the maximum output power was 20 mW at the central lasing wavelength of 1020 nm, the laser pulse duration was 120 fs at a repetition frequency of 87 MHz. The obtained results indicate that yttrium-gadolinium vanadate crystals doped with ytterbium ions are promising for use as active media in diode-pumped lasers generating ultrashort pulses in the region of about 1 μm .

Key words: ytterbium; vanadate; laser properties; mode-locking.

*Адрес для переписки: Кисель В.Э., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: vekisel@bntu.by*

Эффективные, компактные и стабильные источники импульсного лазерного излучения ультракороткой длительности, выполненные в виде твердотельных лазеров с накачкой полупроводниковыми лазерными диодами, востребованы в различных областях научных исследований, и обеспечивают параметры излучения, необходимые для реализации различных технологических и медицинских применений. Импульсы лазерного излучения фемтосекундной длительности востребованы в нестационарной спектроскопии, нелинейно-оптических преобразователях частоты, обработке различных материалов с высокой пространственной точностью, оптической когерентной томографии, офтальмологии, нейрохирургии и других отраслях.

Широкое распространение для получения ультракоротких импульсов (УКИ) нашли кристаллические среды, легированные трехвалентными ионами иттербия (Yb^{3+}). Основными достоинствами иттербиевых материалов являются наличие широких и интенсивных полос усиления в спектральной области около 1 мкм, а также наличие сильных полос поглощения в диапазоне излучения коммерчески доступных мощных эффективных InGaAs лазерных диодов накачки. Кроме того, простая структура энергетических уровней

иона Yb^{3+} исключает влияние ап-конверсионных и кросс-релаксационных паразитных эффектов на параметры лазера. Для иттербиевых материалов характерно низкое тепловыделение вследствие работы по квази-трехуровневой схеме генерации с характерными значениями Стоксова сдвига между длинами волн накачки и генерации около 5 %, что особенно актуально при работе лазера с высокой средней выходной мощностью.

Интерес к смешанным кристаллам с ионами Yb^{3+} в основном обусловлен их потенциальными преимуществами для применения в лазерных системах генерации УКИ. В данных приложениях ширина спектра усиления активной среды напрямую влияет на параметры УКИ, а точнее, на возможность генерации световых импульсов с более короткой длительностью. Поэтому дополнительное неоднородное уширение полосы стимулированного испускания, вносимое разупорядоченной структурой кристалла, также представляет интерес для подобных лазерных систем. В данной работе исследовались генерационные свойства кристалла гадолиний-иттриевого ванадата, легированного трехвалентными ионами иттербия, со следующим составом: $\text{Yb}^{3+}:\text{Gd}_{0.64}\text{Y}_{0.36}\text{VO}_4$ (GdYVO) [1].

Рост кристаллов $\text{Yb}:\text{GdYVO}$ проводился методом Чохральского в иридиевом тигле в атмосфере

аргона с кислородом. При частоте вращения 10×15 оборотов в минуту скорость вытягивания кристалла составляла 2–3 мм/ч. Полученные монокристаллы обладали высоким оптическим качеством. Размер були составлял: диаметр – 30 мм; длина – 35 мм, концентрация ионов иттербия варьировалась от 1,6 ат.% до 3 ат.% по отношению к ионам Y^{3+} . Результаты исследования спектроскопических характеристик кристаллов $Yb:GdYVO$ представлены ранее в работе [2]. При проведении лазерных экспериментов в непрерывном режиме генерации при использовании лазерного диода с максимальной выходной мощностью до 8 Вт и полусферического резонатора достигнута выходная мощность до 850 мВт на длине волны 1020 нм при дифференциальной эффективности 45 % по отношению к поглощенной мощности накачки [2].

Для исследования генерационных свойств кристаллов $Yb:GdYVO$ в режиме пассивной синхронизации мод использовалась лабораторная установка, схема которой приведена на рисунке 1. Излучение лазерного диода накачки с максимальной выходной мощностью 0,5 Вт на длине волны 976 нм фокусировалось в кристалл в пятно диаметром около 40 мкм. Кристалл был вырезан под углом Брюстера для работы с π -поляризацией излучения. Толщина активного элемента вдоль оптической оси резонатора составляла 2 мм. Концентрация активных центров составляла 2,1 ат.%. Для возможности тонкой подстройки величины дисперсии групповой скорости резонатора использовалась пара призм из стекла SF-10.

Экспериментально реализован режим пассивной синхронизации мод на основе Керровской нелинейности с мягкой апертурой. Автокорреляционная функция полученных фемтосекундных импульсов представлена на рисунке 2. Максимальная выходная мощность в режиме генерации фемтосекундных импульсов составила 20 мВт на центральной длине волны генерации 1020 нм, длительность лазерных импульсов составила 120 фс на частоте следования 87 МГц.

Полученные результаты показывают, что кристалл $Yb:GdYVO$ по генерационным характеристикам находится на уровне лучших иттербийсо-

держающих активных сред. Как видно из проведенных исследований, кристаллы гадолиний-иттриевого ванадата, легированные ионами иттербия, являются перспективными материалами для создания лазеров с диодной накачкой, генерирующих сверхкороткие импульсы в области около 1 мкм.

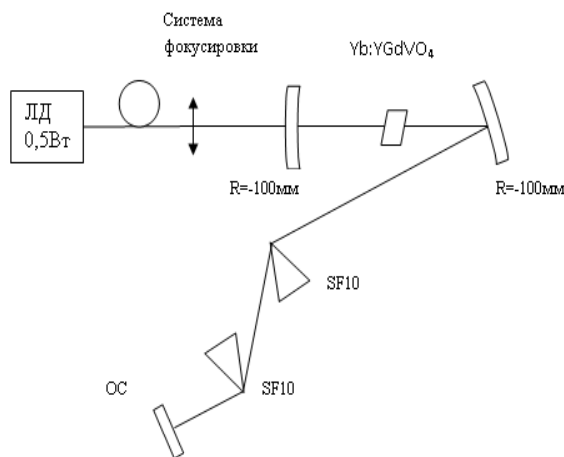


Рисунок 1 – Схема лазера на основе кристалла $Yb:Gd_{0.64}Y_{0.36}VO_4$

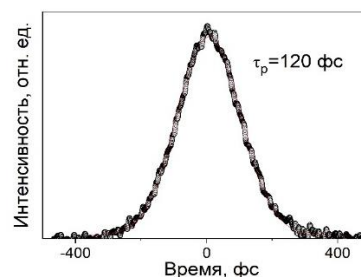


Рисунок 2 – Автокорреляционная функция УКИ $Yb:Gd_{0.64}Y_{0.36}VO_4$ лазера

Литература

1. Spectroscopy and laser performance of $Yb^{3+}:Yb:GdVO_4$ crystal / V.E. Kisel [et al.] // CLEO-Europe 2005 International Conference Technical Digest. – Paper CA9-6-TUE.
2. Morier-Genoud, U. Keller. Spectroscopy and femtosecond laser performance of $Yb^{3+}:Gd_{0.64}Y_{0.36}VO_4$ crystal / V.E. Kisel [et al.] // Applied Physics B. – 2006. – Vol. 85. – P. 581–584.

УДК 528.8.042

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО СКАНЕРА НА УШИРЕНИЕ ПРОЕКЦИИ ЛАЗЕРНОГО ПЯТНА

Гусаров И.Е.^{1,2}, Калугин А.И.², Соболев К.К.¹

¹ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова»

²УдмФИЦ УрО РАН

Ижевск, Российская Федерация

Аннотация: В работе предложено разделение параметров лазерных сканирующих систем на внутренние и внешние. К числу внутренних параметров относятся конструктивные параметры элементов сканера и сканирующего блока в целом. Под внешними параметрами понимаются характеристики режима сканирования (размер сканируемой области, время построения строки и прочее). Наиболее важным внешним параметром является качество получаемого изображения, так как искажения кадра сканирования может привести к частичной потере информации о состоянии исследуемого пространства. В работе представлены результаты вычислительного эксперимента, целью которого являлось определение характера зависимости размера проекции лазерного пятна на сканируемой плоскости при различном угле подачи излучения на грань полигонального дефлектора и различном количестве граней дефлектора.

Ключевые слова: лазерное сканирование, лазерный сканер, полигональный дефлектор, искажения кадра сканирования, уширение лазерного пятна.

INFLUENCE OF LASER SCANNER DESIGN PARAMETERS ON THE BROADENING OF LASER FOOTPRINT

Gusarov I.E.^{1,2}, Kalugin A.I.², Sobolev K.K.¹

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University

²Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

Izhevsk, Russian Federation

Abstract. The paper proposes a division of the parameters of laser scanning systems into internal and external. Internal parameters include the design parameters of the scanner elements and the scanning unit as a whole. External parameters refer to the characteristics of the scanning mode (size of the scanned area, line construction time, etc.). The most important external parameter is the quality of the resulting image, since distortion of the scanning frame can lead to partial loss of information about the state of the space under study. The paper presents the results of a computational experiment, the purpose of which was to determine the nature of the dependence of the size of the laser footprint on the scanned plane at different incident angles on the face of the polygonal deflector and a different number of deflector faces.

Key words: laser scanning, laser scanner, polygonal deflector, scan frame distortion, broadening of laser beam.

e-mail: gusarovie@udman.ru

Введение. В настоящий момент технология лазерного сканирования становится все более востребована и уже нашла применение во многих областях деятельности человека, таких как геодезия, космическое дело, военная отрасль и других сферах. Для эффективного осуществления данной задачи используется часто призмный дефлектор, представляющий собой многогранную призму с отражающими гранями, который позволяет производить быстрое заполнение широкой области сканирования импульсами лазерного излучения по одной координате [1; 2].

При проектировании лазерных сканирующих систем можно выделить внешние и внутренние характеристики устройства. К внешним характеристикам относятся параметры режима работы сканера, под которыми понимаются время построения кадра сканирования, качество получаемого изображения, угловые размеры зондируемой области, минимальный линейный размер

обнаруживаемых объектов, максимальная дистанция зондирования и прочие. В свою очередь, к внутренним параметрам системы можно отнести диаметр лазерного пучка на выходе из передающей оптической системы, размер лазерного пятна в области сканирования, частоту следования импульсов излучения, тип сканирующих элементов системы и их характеристики и т. д.

Одним из наиболее важных внешних параметров системы является качество получаемого изображения. Различные искажения траектории сканирования вследствие инерционности оптических сканирующих элементов [3] или искажения проекции лазерного пятна в наблюдаемой области и неоднородности расположения лазерных пятен негативно влияют на качество получаемой информации о состоянии сканируемого пространства вплоть до ее частичной потери.

В работе [4] представлена зависимость величины неоднородности расположения лазерных

пятен (изменение расстояния между центрами лазерных пятен) в плоскости сканирования в зависимости от числа граней призматического дефлектора при различных углах подачи излучения на дефлектор. Из приведенных в работе зависимостей следует, что характер изменения величины неоднородности не зависит от количества граней, при этом максимальное расстояние между центрами соседних пятен ограничено угловым размером строки сканирования формируемой полигональным дефлектором с заданным количеством граней. Также стоит отметить, что при изменении угла подачи излучения на грань изменяется и положение центра строки сканирования, но угловой размер сканируемого пространства остается неизменным.

Искажение проекции лазерного пятна в наблюдаемой области. Для выполнения вычислительного эксперимента была использована компьютерная программа, моделирующая работу сканирующей системы, состоящей из полигонального дефлектора и источника лазерного излучения. Данная программа осуществляет расчет хода n -го количества лучей составляющих лазерный пучок через сканирующую систему вплоть до пересечения с плоскостью наблюдения.

При проведении вычислений было принято следующее: 1) лазерный источник вне зависимости от его габаритов и положения относительно дефлектора не ограничивает поле сканирования; 2) в случае засветки лазерным пучком двух соседних граней полигонального дефлектора, дальнейший расчет хода лучей составляющих данный пучок не проводится; данное положение используется в реальности для предотвращения возникновения паразитных отражений внутри системы [5], однако данная мера влечет за собой уменьшение теоретически возможной величины угла сканирования; 3) расходимость пучка равна нулю; 4) плоскость наблюдения расположена перпендикулярно биссектрисе угла сканирования.

Моделируемая система имеет следующие характеристики: диаметр лазерного пучка на выходе из объектива лазера 5 мм, расстояние от выходного окна лазера до центра координат $L_1 = 75$ мм, расстояние от центра сканируемой плоскости до центра координат $L_2 = 1000$ мм. Схема моделируемой системы приведена на рисунке 1. В качестве параметра характеризующего уширение проекции лазерного пятна предлагается использовать относительное уширение проекции пятна ΔS :

$$\Delta S = \frac{S}{S_0}, \quad (1)$$

где S – площадь проекции пучка в плоскости наблюдения, S_0 – площадь пучка в плоскости выходной апертуры лазера.

Результаты расчета представлены в графической форме на рисунке 2. Из рисунка видно, что при малых углах подачи излучения на грань полигонального дефлектора величина относительного

уширения проекции пятна меняется симметрично при приближении к краям строчной развертки. Однако при увеличении угла α симметрия нарушается. Так, ΔS увеличивается значительно с одной из сторон строки, в то время как в другой половине строки наблюдается уменьшение наклона кривой изменения интересующей нас величины. При этом, как было указано ранее, происходит смещение центра строки сканирования.

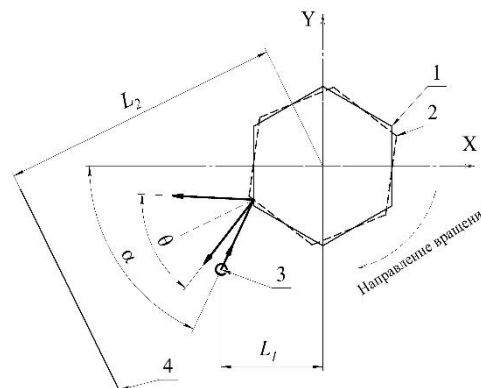


Рисунок 1 – Схема моделируемой системы: 1 и 2 – полигональный дефлектор в начальном и конечном положении соответственно; 3 – выходное окно лазера; 4 – сканируемая плоскость; α – угол подачи излучения; θ – угол сканирования

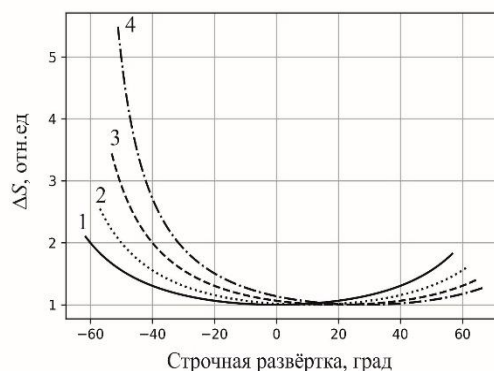


Рисунок 2 – Зависимость относительного уширения лазерного пятна от угла подачи излучения на грань дефлектора: 1 – угол подачи $\alpha = 10^\circ$; 2 – 20° ; 3 – 30° ; 4 – 40°

В результате анализа полученных зависимостей можно сделать вывод о том, что эффективный угловой размер поля сканирования меньше его теоретического значения. Данный вывод основан на факте увеличения площади проекции лазерного пятна при удалении от центра строчной развертки, что вкрупне с увеличением расстояния между центрами соседних пятен в крайних областях строки сканирования приводит к уменьшению плотности мощности на краях сканируемой области. Наименьшим искажением строки сканирования вследствие уширения пятна обладают системы, построенные на базе дефлектора с большим числом граней, что вызвано, во-первых, меньшим углом сканирования и как следствие

меньшей величиной ΔS при удалении от центра кадра, а во-вторых возможностью подачи излучения на грань под меньшим углом α , но недостатком таких систем является большой габаритный размер элемента сканирования [2].

Литература

1. Marshall, G.F. Handbook of Optical and Laser Scanning, Second Edition / G.F. Marshall, G.E. Stutz. – Marcel Dekker publishing, 2004. – 291 p.

2. Расчет параметров призмного дефлектора лазерного сканера / И.Е. Гусаров [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14, № 1. – С. 54–61.

3. Выбор сканера для лазерной локационной системы / С.И. Артамонов [и др.] // Оптический журнал. – 2016. – Т. 83, № 9. – С. 51–59.

4. Li, Y. Laser beam scanning by rotary mirrors. II. Conic-section scan patterns / Y. Li // Applied optics. – 1995. – Vol. 34, № 28. – P. 6417–6430.

5. Non-back-reflecting polygon scanner with applications in surface cleaning / H.-M. Hoang [et al.] // Opt. Express. – 2021. – Vol. 29. – P. 32939–32950.

УДК 681.7

ОПЫТНЫЙ ОБРАЗЕЦ ВЫСОТНОГО КАЛИБРОВОЧНОГО ПУНКТА ДЛЯ КАЛИБРОВКИ СПУТНИКОВЫХ СЕНСОРОВ И ВАЛИДАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ

Ивуть П.В., Щербаков Н.Г., Гуторов А.В., Ломако А.А., Голубев Ю.В., Беляев Б.И., Сосенко В.А., Литвинович Г.С., Хомицевич А.Д.

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

Аннотация. В данной работе представлен комплекс аппаратуры, являющийся средством мониторинга состояния подстилающих поверхностей в наземных условиях, позволяющий осуществлять регистрацию спектральных отражательных характеристик объектов в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне с высокой частотой, а также с высоким пространственным и спектральным разрешением.

Ключевые слова: гиперспектральная система, датчик состояния небесной полусферы, датчик спектральной освещенности, аппаратура для спектрофотометрирования.

PROTOTYPE MODEL HIGH-ALTITUDE SYSTEM FOR CALIBRATION SATELLITE SENSORS AND VALIDATION MEASUREMENTS

Ivuts P., Shcherbakou M., Gutorov A., Lomako A., Golubev Yu., Belyaev B., Sosenko V., Litvinovich G., Khomitsevich A.

A.N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physics Problems of BSU
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A set of equipment is designed for remote acquisition of spectral and images of the Earth's surface in visible and near infrared range is presented. It allows capturing spectral reflectance characteristics in high frequency, spatial and spectral resolution.

Key words: hyperspectral imaging system, celestial measurement system, spectral light sensor, spectrometry system.

Адрес для переписки: Ивуть П.В., ул. Курчатова, 7, г. Минск, 220045, Республика Беларусь
e-mail: ivut.pasha@yandex.ru

Гиперспектральные системы (ГСС) достаточно широко используются при дистанционном зондировании Земли с различных носителей, а также при наземных и полетных калибровках авиакосмических систем. Разработанная аппаратура ГСС имеет свои новые элементы формирования гиперспектральных изображений в диапазоне 400–900 нм.

Изделие предназначено для решения задач полетной калибровки спутниковых сенсоров и валидации спутниковых измерений, создания спектральных баз данных коэффициентов отражения природных и искусственных объектов, которые используются для диагностики и мониторинга состояния объектов на поверхности Земли.

Блок спектральной съемки, производящий регулярные измерения спектров отражения одних и тех же природных и искусственных эталонных площадок, обеспечивает получение данных для калибровки спутниковых сенсоров и валидации космического мониторинга территорий Беларуси с частотой не ниже 1 раза в сутки.

В состав блока спектральной съемки (рисунок 1) входят следующие модули: гиперспектральная система (ГСС); широкодиапазонный спектрорадиометр (ШСР); видеокамера наведения (ВН); система наведения и сканирования по азимуту и углу вертикальной плоскости (СНС); контроллер управления; датчик метеопараметров; датчик состояния небесной полусферы; датчик спектральной освещенности.

ГСС обеспечивает получение спектральной плотности энергетической яркости объектов в диапазоне 400–900 нм и состоит из входного объектива, полихроматора, приемной матрицы. Размер и количество чувствительных элементов приемной ПЗС матрицы в направлении дисперсии полихроматора определяют ширину, число и локализацию спектральных рабочих интервалов. В качестве матрицы используется детектор QHY268M Pro I [1]. Число и размер пикселей матрицы в перпендикулярном направлении определяет размер полосы спектрального разрешения и

в противоположном направлении пространственное разрешение. Число приемных элементов матрицы 6280×4210 , с размером элемента $3,76 \times 3,76$ мкм. При этом программно можно настроить параметры биннинга, усиления и активной используемой области детектора.



Рисунок 1 – Внешний вид и состав ГСС:

- 1 – датчик состояния небесной полусферы;
2 – датчик спектральной освещенности; 3 – ВН;
4 – ШСР; 5 – ГСС; 6 – СНС.

Широкодиапазонный спектро радиометр (ШСР), обеспечивает получение и регистрацию спектров отражения природных и антропогенных объектов в диапазоне $900\text{--}2500$ нм и состоит из входного объектива, полихроматора, линейчатого приемника излучения Hamamatsu InGaAS G9208-256W с числом приемных элементов 256, размером элемента 50×250 мкм, со скоростью съемки 5 кадров в секунду.

Цифровая цветная видеокамера наведения работает по IP-протоколу и предназначена для привязки гиперспектральных данных к тестовым объектам съемки, а также для визуальной оценки состояния области измерений.

СНС обеспечивает поворот оптических осей ГСС, ШСР и ВН в плоскостях:

- в горизонтальной плоскости (по азимуту) до 170° ;
- в вертикальной плоскости на угол $\pm 17^\circ$.

Скорость сканирования и точность наведения СНС по азимуту и углу вертикальной плоскости соответствуют пространственно-временным характеристикам ГСС и ШСР.

Датчик спектральной освещенности – это малогабаритный спектро радиометр MC 15. Оптическая схема спектрометра основана на вогнутой дифракционной решетке по схеме Роуленда с дополнительным плоским зеркалом для уменьшения габаритов. Зеркальная дифракционная решетка имеет диаметр 22 мм, 520 штр./мм и радиус кривизны 60 мм, что обеспечивает минимальные габариты. Рассчитанный спектральный диапазон работы прибора составляет $400\text{--}900$ нм.

В качестве датчика состояния небесной полусферы используется IP камера видеонаблюдения с объективом «рыбий глаз».

Для управления и контроля ГСС разработан программный комплекс (ПК), состоящий из ряда взаимосвязанных компонентов: модуля управления спектро радиометрами; модуля управления метеоблоком; модуля управления СНС по азимуту и углу вертикальной плоскости; модуля управления и сбора данных ВН; модуля контроля текущего состояния системы. Особенностью компонентов, отвечающих за взаимодействие с метеоблоком и СНС, является использование специального протокола связи управляющего компьютера с микроконтроллером через COM-порт, разработанного в ходе данной работы.

Для получения необходимых выходных данных всего программного комплекса существует итеративный алгоритм выполнения съемки. В результате выполнения одной итерации регистрируется один спектр отражения ШСР, одна строка итогового гиперспектрального изображения, одно изображение ВН. Данные связываются по временным меткам в именах файлов. Все данные, регистрируемые различными модулями ПК, можно представить в привязке к данным ВН.

Данные ГСС сшиваются в единое гиперспектральное изображение и могут быть обработаны как объединенный гиперкуб данных в дополнительном программном компоненте обработки, который позволяет осуществлять фильтрацию данных по пространственным и спектральным составляющим, а также синтезировать мультиспектральные изображения с учетом функций спектрального отклика в каналах спутниковых систем, которые нуждаются в калибровке.

Программный комплекс реализован на языке программирования C++ с использованием фреймворка Qt. В целях оптимизации работы программы были использованы возможности языка программирования и фреймворка – разделение процессов регистрации и сохранения данных различными сенсорами на связанные с использованием слот-сигнальной системы потоки. За счет этого удается ускорить процесс получения данных.

Заключение. Первые тестовые включения аппаратуры показывают, что разработанный блок спектральной съемки, производящий в автоматическом режиме регулярные измерения спектров отражения, с высокой частотой позволяет производить квазисинхронные измерения со спутником, что повышает точность калибровки. Это может существенно увеличить уровень валидности данных, регистрируемых спутниковыми системами (в том числе Канопус-В).

Литература

1. Официальный сайт QHYCCD. QHY268M Pro I [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.qhyccd.com/scientific-camera-qhy268m-pro>.

УДК 629.785:621.373.826

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДОПУСТИМЫХ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ВО ВНУТРЕННЕМ ОБЪЕМЕ ЛАЗЕРНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЛАЗЕРНЫХ ПЕРЕДАЮЩИХ БЛОКОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ
Фёдорцев Р.В.², Орехов К.А.¹, Орехова В.Е.¹, Серов М.П.³, Позднякова О.М.²

¹ОАО «Пеленг»

²Белорусский национальный технический университет

³УО «Национальный детский технопарк»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассмотрены основные технические аспекты, связанные с обеспечением общего ресурса работы передающих блоков лазерных высотомеров орбитальных космических аппаратов, предназначенных для исследования планет, лун и астероидов. Для обеспечения общего ресурса работы передающего лазерного блока в несколько десятков или сотен миллионов импульсов целесообразно: обеспечить герметичность внутреннего объема излучателя, обеспечить заполнение его объема смесью очищенного кислорода и азота; свести к минимуму количество применяемых полимеров, проводить соответствующую технологическую подготовку оптических и механических деталей с использованием дегазации и последующего контроля наличия органических загрязнений.

Ключевые слова: дальномер, лазерный высотомер, передающий модуль, импульсы, ресурс.

RESEARCH OF MATERIALS ALLOWED FOR USE IN THE INTERNAL VOLUME OF LASER EMMITTERS AND METHODS OF ENSURING THE RELIABILITY OF LASER TRANSMISSION UNITS FOR SPACE APPLICATIONS

Feodortsau R.V.², Orekhov K.A.¹, Orekhova V.E.¹, Serov M.P.³, Pozdnykova O.M.²

¹JSC "Peleng"

²Belarusian National Technical University

³EI "National Children's Technopark"

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article discusses the main technical aspects related to ensuring the general operating life of the transmitting units of laser altimeters of orbital spacecraft intended for the study of planets, moons and asteroids. To ensure a total service life of the transmitting laser unit of several tens or hundreds of millions of pulses, it is advisable to: ensure the tightness of the internal volume of the emitter, ensure that its volume is filled with a mixture of purified oxygen and nitrogen; minimize the amount of polymers used, carry out appropriate technological preparation of optical and mechanical parts using outgassing and subsequent monitoring for the presence of organic contaminants.

Keywords: rangefinder, laser altimeter, transmitter module, impulses, resource.

Адрес для переписки: Фёдорцев Р.В., ул. Макаёнка, 25, г. Минск, 220114, Республика Беларусь
e-mail: feodrw@gmail.com

Как правило лазерные высотомеры используются в составе топографических комплексов для уточнения высотных привязок полученных кадров снимаемой поверхности. Основными узлами лазерных высотомеров являются передающий канал, приемный канал и регистратор лазерного следа (опционально). Передающий блок обеспечивает формирование энергетических и пространственных характеристик зондирующего излучения. Приемный блок обеспечивает регистрацию старт-сигнала и сигнала, отраженного от поверхности исследуемого объекта. Регистратор лазерного следа обеспечивает привязку направления излучения к кадру поверхности.

Для исследования земной поверхности орбита спутника, как правило, составляет около 500 км. Для исследования Луны либо астероидов орбита может колебаться от 100 до 200 км. При этом для получения более точной привязки по дальности стараются минимизировать расходимость излучения лазера до уровня 60–100 мкрад.

Частота работы лазера обусловлена частотой работы съемочной аппаратуры. Длина волны излучения определяется окном прозрачности атмосферы и наличием чувствительных фотоприемников. В нашем случае лазер реализован на кристалле Nd:YAG и имеет длину волны 1064 нм.

Обеспечение надежного и непрерывного функционирования передающих и приемных модулей лазерных дальномеров является одной из важнейших задач, решаемых применением комплекса конструкторских и технологических мероприятий.

Лазерный передающий блок состоит из двух основных узлов: излучателя и формирующего телескопа.

Лазерный излучатель состоит из резонатора, образованного двумя зеркалами, внутрирезонаторной линзы, электрооптического затвора и системы накачки (квантрона). Накачка активного элемента (АЭ) Nd:YAG 5×100 мм осуществляется матрицами лазерных диодов в количестве 21 шт, импульсной мощностью 500 Вт каждая.

Максимальная мощность, выделяемая на квантоне при частоте 2 Гц, составляет не более 1 Вт, что не требует активного охлаждения. Энергия излучения в импульсе составляет 170 мДж.

Исходя из соображений обеспечения механической чистоты внутррезонаторных деталей и оптических компонентов сборка лазерных передающих блоков (ЛПБ) должна осуществляться в чистых помещениях, соответствующих 6 классу ГОСТ ISO 14644-1.

При подготовке оптических компонентов перед сборкой производится контроль их класса чистоты с отбраковкой (ОТК), проверка лучевой стойкости (Lidaris, Литва). Для АЭ проводится анализ генерационных характеристик, профили люминесценции и двулучепреломления. Матрицы лазерных диодов подвергаются электротермотренировке и ресурсным испытаниям.

При функционировании в условиях вакуума конструкция лазерного излучателя должна обеспечивать герметичность, поддерживать давление внутри корпуса на уровне не менее 1,0 атм., так как при пониженном давлении лучевая стойкость оптических компонентов падает [1], а также понижается величина напряжения пробоя для между электродами электрооптического затвора.

Основными конструктивными элементами в общей сборке модуля лазерного излучателя, через которые происходит потеря давления являются:

- место контакта выходного окна и оправы;
- электрические разъемы подключения модулятора добротности;
- канавка с уплотнителем между крышкой и корпусом.

На первом этапе проектирования в качестве используемых закладывались материалы, аттестованные для космического применения. При этом стало очевидным, что данный критерий является недостаточным. Результаты испытаний в барокамере показали падение энергии излучения с исходных 173–180 мДж до уровня ниже 100 мДж в течении 300 тыс. импульсов. Основной причиной снижения выходной энергии излучателя явилось образование налета на рабочих поверхностях оптических деталей внутри резонатора (рисунок 1).

Основным источником загрязнений атмосферы внутри корпуса ЛПБ является герметик на силиконовой основе (Elasil RT772). При застывании в контуре канавки он выделяет летучие вещества, которые проникают во внутренний объем. С целью устранения указанного недостатка были изготовлены 2 ЛПБ без использования герметика. Герметизация в одном из образцов (ТО-1) осуществлялась посредством индией фольги, по итогам испытаний ресурс работы составил более 4 000 000 импульсов без регистрируемого снижения уровня выходной энергии, однако при высокой утечке воздуха (рисунок 2, а). Герметизация

во втором образце (ТО-2) осуществлялась посредством резины Пентэласт 750, общий ресурс испытаний составил 2 700 000 импульсов (рисунок 2, б).

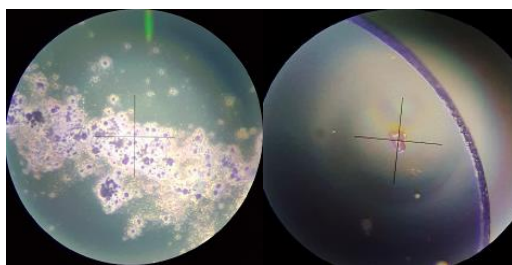


Рисунок 1 – Дефекты на глухом зеркале резонатора

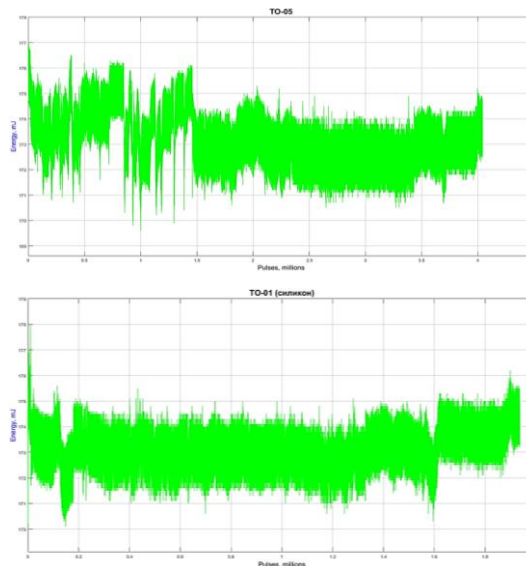


Рисунок 2 – График изменения выходной энергии в течение ресурсных испытаний, герметизация: а – индией фольга (ТО-1); б – силикон (ТО-2)

Дополнительными источниками загрязнений выявлены термоусадки шин накачки, кольца крепления АЭ, шины подачи питания (остаточный флюс), клеевые соединения оптики и оправ, а также материалы, попадающие снаружи (следы материала перчаток, осыпка фильтров ламинарной камеры). Была разработана методика проверки материалов допустимых к использованию в ЛПБ. В герметичную колбу (рисунок 3) помещается исследуемый материал, через нее проводится пучок с плотностью энергии в 1,2–1,5 раза превышающей плотность в резонаторе ЛПБ. Если на окнах колбы появляется налет после 500 тыс. импульсов, то материал отбраковывается, либо увеличивается время его дегазации и эксперимент проводится повторно.

На основании проведенных испытаний и с целью предотвращения образования налета в конструкцию ЛПБ были внесены следующие изменения:

- значительно уменьшилась масса применяемых клеев, поскольку полимерные материалы выделяют большое количество летучих газов и частиц вещества;

- произведена замена материалов колец, обжимающих АЭ с метилвинилового силикона VMQ на кольца из резины FFKM;
- герметик Elasil RT772 был заменен на Dow Corning 93-500 и Пентглас 750;
- для всех материалов длительность дегазации увеличилась с 8 ч до 24 ч;

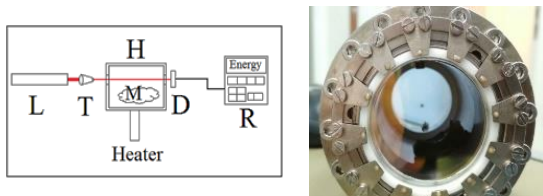


Рисунок 3 – Схема исследования материалов

– внутренний объем лазерного излучателя целесообразно заполнять смесью из очищенных кислорода и азота.

Установлено также что материалы на основе фторопластов после проведения дегазации хорошо подходят для применений в лазерном резонаторе. Разработанная методика отбора материалов оказалась наиболее эффективной для достижения ресурса в десятки миллионов импульсов.

Текущий подтвержденный ресурс ЛПБ 84 млн импульсов.

Литература

1. Wernham, D. Optical Coatings in Space / D. Wernham // Advances in Optical Thin Films IV, Proc. of SPIE. – 2011. – Vol. 81680F.

УДК 621.375.826

УСЛОВИЯ И РЕЖИМЫ ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ МАГНИЙ-АЛЮМИНИЕВОЙ ШПИНЕЛИ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ Co^{2+} С РАЗЛИЧНОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ, И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ИМПУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРАХ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Кисель В.Э., Горбаченя К.Н., Гоман В.И.

*НИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Исследованы условия и режимы роста кристаллов $Co^{2+}:MgAl_2O_4$ с различной концентрацией двухвалентных ионов кобальта. Измерены спектры поглощения выращенных образцов, проведены лазерные эксперименты по исследованию их генерационных характеристик в лазере на основе Er:стекло с диодной накачкой.

Ключевые слова: рост кристаллов, спектры поглощения, кристалл, пассивная модуляция добротности, двухвалентные ионы кобальта.

MAGNESIUM-ALUMINUM SPINEL CRYSTALS ACTIVATED WITH Co^{2+} IONS WITH DIFFERENT CONCENTRATIONS: GROWS AND APPLICATION IN DIODE-PUMPED PULSED LASERS

Kisel V.E., Gorbachenya K.N., Goman V.I.

*Center for Optical Materials and Technologies BNTU
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Growth process of $Co^{2+}: MgAl_2O_4$ crystals was investigated for different concentration of divalent cobalt ions. Absorption spectra of different samples were measured and their laser properties in Er:glass laser under diode-pumping were investigated.

Key words: crystal grows, absorption spectra, crystal, passive Q-switching, divalent cobalt ions.

Адрес для переписки: Кисель В.Э., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: vekisel@bntu.by

Лазерное излучение с длиной волны 1,5–1,6 мкм имеет ряд достоинств, интересных для широкого практического применения в лазерной дальнометрии, медицине, системах оптической локации и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии благодаря целому ряду причин. Основным преимуществом указанного излучения является условная безопасность для органов зрения людей вследствие того, что малая часть излучения попадает на сетчатку, поглощаясь до нее роговицей и хрусталиком. Кроме того, из-за высо-

кого поглощения излучения водой при микрохирургических вмешательствах на поверхности прозрачных тканей глаза излучением данной длины волны уменьшаются глубина термического некроза и порог абляции. К тому же, благодаря прозрачности атмосферы, а также высокому пропусканию излучения с длиной волны 1,5–1,6 мкм в условиях тумана, дыма и пара, лазерные источники указанного диапазона используются в системах оптической локации и дистанционного зондирования Земли.

В настоящее время существует большое количество источников лазерного излучения с длиной волны 1,5–1,6 мкм: волоконные лазеры, полупроводниковые лазеры, параметрические генераторы света и лазеры на основе вынужденного комбинационного рассеяния. Однако благодаря простоте и компактности конструкции, наибольший интерес разработчиков лазерных систем привлекают твердотельные лазеры на основе материалов, со-активированных ионами эрбия и иттербия, например Yb,Er:стекло, данная активная среда наиболее полно удовлетворяет требованиям получения эффективной лазерной генерации, в том числе, при диодной накачке. На практике наиболее востребованными являются импульсные излучатели. Одним из наиболее распространенных и простых методов получения импульсного лазерного излучения является режим пассивной модуляции добротности, для получения которого используют насыщающиеся поглотители. Для лазеров спектрального диапазона 1,5–1,6 мкм наиболее эффективным насыщающимся поглотителем выступает кристалл магний-алюминиевой шпинели с ионами Co^{2+} .

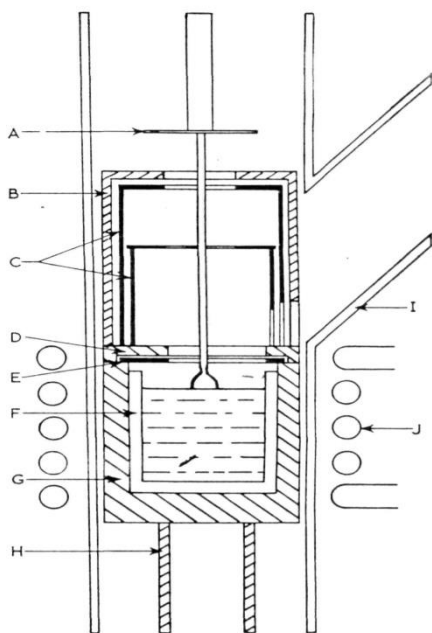


Рисунок 1 – Установка для выращивания монокристаллов шпинели методом Чохральского: *A* – отражающий диск Pt/20%Rh; *B* – алюминиевый чехол; *C* – иридиевые экраны; *D* – магниевая прокладка; *E* – иридиевое кольцо; *F* – иридиевый тигель; *G* – магниевый чехол; *H* – алюминиевое основание; *I* – кварцевая обшивка; *J* – радиочастотный индуктор

Кристаллы шпинели, использованные в работе, выращивались методом Чохральского в иридиевых тиглях. Для кристаллов MgAl_2O_4 температура роста составляет 2350–2370 °С, что сравнимо с температурой плавления материала тигля 2410 °С. Для снижения тепловой нагрузки на

стенки тигля использовалась разработанная оригинальная низко градиентная тепловая схема (рисунок 1). Использование иридиевого экрана над тиглем снизило радиальные градиенты в расплаве для предотвращения растрескивания тигля и повышения качества кристаллов. Использование верхних иридиевых экранов снизило температурные градиенты в зоне охлаждения кристалла для уменьшения внутренних напряжений.

Спектры поглощения выращенных кристаллов $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ с различным уровнем примеси представлены на рисунке 2.

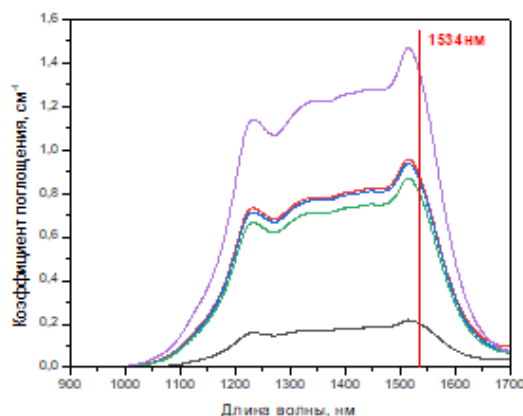


Рисунок 2 – Спектры поглощения выращенных кристаллов $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ различной концентрации

Для проведения лазерных экспериментов были изготовлены полированные образцы пассивных затворов с одинаковым уровнем начального пропускания на длине волны генерации лазера на основе Er: стекло около 1,534 мкм.

Для оценки влияния концентрации ионов Co^{2+} в кристаллах магний-алюминиевой шпинели на выходные характеристики лазерного излучения проведены экспериментальные исследования в схеме излучателя с продольной диодной накачкой. В качестве активного элемента использовалось плоскопараллельный образец фосфатного стекла с содержанием ионов эрбия около $0,9 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и ионов иттербия около $2,2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ толщиной 2,8 мм. Установка элемента в резонаторе имела ориентацию под углом Брюстера. Использовалось плоское выходное зеркало с пропусканием около 6,5 % на длине волны 1534 нм и плоское высокоотражающее зеркало. Затвор, без просветляющих диэлектрических покрытий, также устанавливался в резонаторе под углом Брюстера. Общая геометрическая база резонатора составляла 25–27 мм. Для накачки использовался лазерный диод с волоконным выводом излучения с выходной мощностью до 13 Вт на длине волны 940 нм. Излучение накачки фокусировалось в пятно диаметром около 600 мкм по уровню $1/e^2$. Параметры выходных импульсов для насыщающихся поглотителей, изготовленных из кристаллов с различной концентрацией Co^{2+} , представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры выходного излучения

Коэфф-т поглощения на $\lambda = 1534$ нм, см^{-1}	Энергия импульса, мДж	Длительность импульса, нс	Пороговая мощность накачки, Вт
1,4	1,1	11	10,1
0,8	1,08	11,5	10,3
0,2	1,05	12	10,5

Из проведенных экспериментов видно, что при использовании менее концентрированных кристаллов наблюдается незначительное снижение энергии выходных импульсов и рост пороговой мощности накачки. Такое поведение может объясняться увеличением толщины насыщающихся поглотителей для достижения одинакового значения слабосигнального пропускания при снижении концентрации ионов Co^{2+} и соответствующего увеличения неактивных ненасыщаемых потерь.

УДК 621.375.826

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОСЛЕРОСТОВОГО ОТЖИГА КРИСТАЛЛОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ВОЛЬФРАМАТОВ С ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ИТТЕРБИЯ НА ИХ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОПТИЧЕСКОЕ КАЧЕСТВО

Кисель В.Э.¹, Горбаченя К.Н.¹, Гурецкий С.А.², Кулешов Н.В.¹¹НИИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ²НПЦ НАН РБ по материаловедению

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследовано влияние различных процессов послеростового отжига кристаллов $\text{Yb:KY}(\text{WO}_4)_2$ с высоким содержанием активатора на их спектрально-люминесцентные свойства и лучевую стойкость к излучению накачки.

Ключевые слова: кристаллы двойных вольфраматов, трехвалентные ионы иттербия, спектры поглощения.

STUDY OF THE INFLUENCE OF POST-GROWTH ANNEALING OF RARE-EARTH TUNGSTATE CRYSTALS WITH HIGH YTTERBIUM CONCENTRATION ON THEIR SPECTRAL CHARACTERISTICS AND OPTICAL QUALITY

Kisel V.E.¹, Gorbachenya K.N.¹, Guretskii S.A.², Kuleshov N.V.¹¹Center for Optical Materials and Technologies BNTU²Scientific and Practical Materials Research Center NAS Belarus

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Influence of different after-grows annealing processes on spectral properties as well as on light induced damage under pump radiation were investigated for heavily Yb-doped $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ crystals.

Key words: double tungstate crystals, trivalent ytterbium ions, absorption spectra.

Адрес для переписки: Кисель В.Э., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: vekisel@bntu.by

Кристаллы калий-иттриевого ($\text{KY}(\text{WO}_4)_2$) вольфрамата относятся к 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 двуосными. 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 $3,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}^{-1}$ вдоль оси оптической индикатрисы N_g , $3,0 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}^{-1}$ вдоль N_m и $2,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}^{-1}$ вдоль N_p .

Для исследования влияния послеростового отжига кристаллов редкоземельных вольфраматов с высокой концентрацией трехвалентных ионов иттербия на их спектральные характеристики и оптическое качество были изготовлены тестовые пластины толщиной 1–4 мм (рисунок 1).

Отжиг проводится после технологических операций по резке и шлифовке заготовок активных элементов, перед процессом чистовой полировки рабочих граней усиливающей среды.

Проведен отжиг кристаллов в двух температурных режимах с максимальными температурами 400 °С и 950 °С. Отжиг проводился в атмо-

сфере кислорода на кварцевых подложках. Температура 950 °С близка к температуре деформации кристаллической решетки кристаллов $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ и $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$. Заготовки перед полировкой отжигались в течение 30 часов со скоростью нагрева и охлаждения около 20 град/час.



Рисунок 1 – Тестовые пластины концентрированных кристаллов $\text{Yb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$

Спектры поглощения измерялись для кристалла $\text{Yb}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ с содержанием ионов иттербия 20 ат.% в области 850–1100 нм.

Для записи спектров поглощения изготавливались плоскопараллельные пластинки толщиной 0,5 мм. Для кристаллов без отжига и образцов, прошедших отжиг в двух режимах, описанных выше. В спектре поглощения для всех кристаллов не наблюдается различий как в области полос поглощения ионов иттербия, так и вне полос. Спектры кристаллов для трех поляризаций излучения представлены на рисунке 2. Для поляризации $E//N_m$ наблюдается сильная полоса с максимумом на длине волны 981,2 нм и шириной на полувысоте около 3,5 нм. При изменении концентрации трехвалентных ионов иттербия в кристаллах наблюдалось пропорциональное изменению концентрации изменение коэффициентов поглощения. Измеренные спектры поглощения для тонких образцов, записанные в широкой спектральной области, представлены на рисунке 2.

Также для всех исследованных образцов кристалла $\text{KYb}_{20}\text{Y}_{80}(\text{WO}_4)$ время жизни верхнего лазерного состояния $^2\text{F}_{5/2}$ ионов Yb^{3+} остается постоянным, что свидетельствует об отсутствии дефектов в исследованных образцах кристаллов с различными послеростовыми операциями отжига. Время жизни верхнего $^2\text{F}_{5/2}$ мультиплета для всех исследованных образцов составляло 233 ± 5 мкс.

Для применения данных кристаллов в качестве активных элементов одним из ключевых параметров является его стойкость к воздействию лазерного излучения. В работе проведено исследование предельных величин падающей на кристалл интенсивностей излучения накачки, кото-

рые приводят к необратимому разрушению активной среды, как правило к растрескиванию. В качестве источника возбуждения использовался лазерный диод с волоконным выводом излучения (диаметр волокна 105 мкм, числовая апертура 0,22) с центральной длиной волны 976 нм и спектральной полушириной около 1 нм. Максимальная мощность лазерного диода составляла около 12 Вт. Излучение фокусировалось на кристалл (без принудительного охлаждения) с помощью линзового объектива с увеличением около 1^{\times} . Зависимость интенсивности излучения, приводящей к повреждению элемента, представлена на рисунке 3.

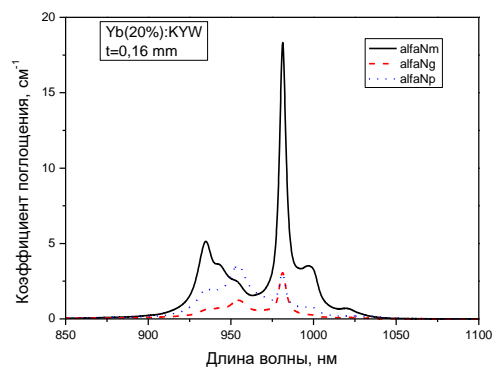


Рисунок 2 – Поляризованные спектры поглощения кристаллов $\text{KYb}_{20}\text{Y}_{80}(\text{WO}_4)$ в спектральной области 900–1100 нм

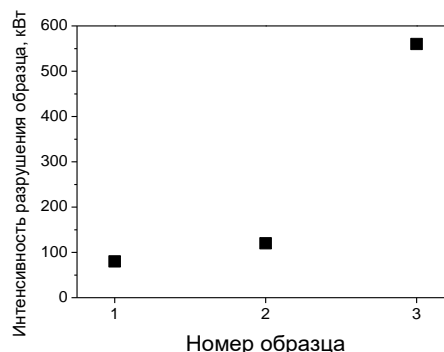


Рисунок 3 – Зависимость времени затухания люминесценции в порошке кристалла $\text{Yb}:\text{KYW}$ от весовой концентрации порошка в этиленгликоле

Номера образцов соответствуют кристаллам: 1 – без отжига; 2 – отжиг при температуре 400 °С; 3 – отжиг при температуре 950 °С. В данном случае заметно существенное увеличение стойкости кристаллов к воздействию излучения накачки, что объясняется релаксацией внутренних напряжений в высококонцентрированных кристаллах, особенно в случае отжига с температурой близкой к температуре деформации кристаллической решетки кристаллов $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$.

УДК 618

ТВ-КАНАЛ ДАЛЬНОМЕРА ВИДИМОГО И БЛИЖНЕГО ИК ДИАПАЗОНОВ

Книга И.В.¹, Маляревич А.М.²

¹ОАО «Пеленг»²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Одной из важных сфер применения прогресса науки и техники является оптико-электронное приборостроение. Объектом разработки является телевизионный канал дальномера видимого и ближнего ИК диапазонов спектра.

Ключевые слова: ТВ-канал, дальномер, ИК-диапазон.

TV CHANNEL OF VISIBLE AND NEAR IR RANGE RANGE FINDER

Книга I.V.¹, Malyarevich A.M.²¹JSC "Peleng"²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. One of the important areas of application of the progress of science and technology is optical-electronic instrumentation. The object of development is a television channel for a range finder in the visible and near-IR spectral ranges.

Key words: TV channel, rangefinder, IR range.

Адрес для переписки: Маляревич А.М., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by, kniga-ilya@mail.ru

В современном мире научно-технический прогресс играет все более значительную роль, приводя к новым открытиям и технологическим прорывам во многих областях человеческой деятельности. Одной из важных сфер применения прогресса науки и техники является оптико-электронное приборостроение. Оптико-электронные приборы являются классом приборов, в которых осуществляется получение и обработка информации об объектах путем преобразования световой энергии в электрический сигнал. Эти приборы имеют широкое применение в различных сферах человеческой деятельности [1].

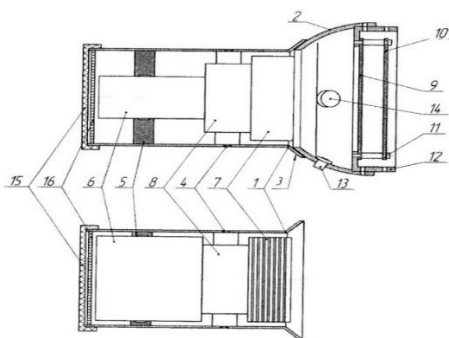


Рисунок 1 – Конструкция модуля захвата цели [2]

Объектом разработки является телевизионный канал дальномера видимого и ближнего ИК диапазонов спектра, который предназначен для обеспечения обзора местности, обнаружения, распознавания и выбора объекта, обеспечения целеуказания в дневное время при освещенности не менее 5000 лк. Кроме того, ТВ-канал выполняет панорамный обзор местности, обнаружение,

опознавание и выбор объекта, обеспечение целеуказания в условиях пониженной естественной освещенности (сумерки и ясное ночное время) от 2000 до 0,3 лк. При этом дальномер обеспечивает с использованием лазера измерение дальности до цели на дистанции 300–2000 м, сохраняет работоспособность при температуре от минус 50 до плюс 50 градусов Цельсия и влажности окружающей среды до 98 %.

Для облегчения юстировки передающего канала дальномера предложено использование дополнительного узла клиньев, располагаемого перед поворотной призмой. Общий вид узла приведен на рисунке 2. Задачей юстировки является обеспечение формирования коллимированного пучка лазерного излучения, которое распространяется в пространстве вдоль оптической оси прибора. Вследствие влияния человеческого фактора юстировщика и неточности изготовления призмы распространенной ошибкой является формирование коллимированного выходного пучка, но распространяющегося под некоторым небольшим углом относительно оптической оси прибора, что на значительном расстоянии приводит к подсветке не всего наблюдаемого объекта и, следовательно, потере важной информации о нем.

Вариант применения конструкции узла клиньев в ТВ канале дальномера представлен на рисунке 3. Его использование позволяет обеспечить выполнение указанной выше задачи юстировки (коллимированность выходного лазерного пучка и его соосность оптической оси прибора), а также сокращение времени юстировки и, следовательно, повышение производительности труда на 30–40 %.

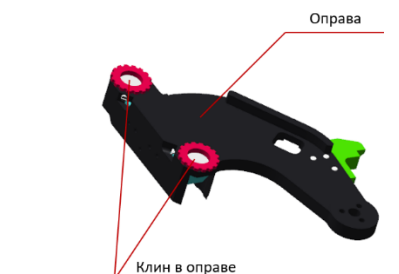


Рисунок 2 – 3D-модель блока клиньев

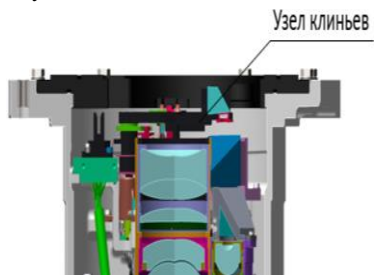


Рисунок 3 – 3D-модель возможной установки узла клиньев

Технические характеристики ТВ-канала с применением предложенного узла клиньев представлены в таблице.

Таким образом, введение узла клиньев позволяет упростить схему юстировки путем уменьшения расходимости, приходящего на призму и выходящего из нее пучков в телевизионном канале дальномера.

Таблица. Технические характеристики ТВ-канала

Наименование канала	Техническая характеристика	Значение
ТВ-канал узкого поля	Эквивалентное фокусное расстояние, мм	121,5
	Угловое поле зрения в пространстве предметов 2ω (по горизонту)	3
	Диаметр входного зрачка	70
	Рабочая область спектра, мм	500–900
	Интегральный коэффициент пропускания в рабочей области спектра	не менее 0,65
ТВ-канал широкого поля	Эквивалентное фокусное расстояние, мм	30
	Угловое поле зрения в пространстве предметов 2ω (по горизонту)	12
	Диаметр входного зрачка	15
	Рабочая область спектра, мм	500–900
	Интегральный коэффициент пропускания в рабочей области спектра	не менее 0,8

Литература

1. Узкопольные телевизионный канал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/91602>.
2. Модуль захвата цели [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://findpatent.ru/patent/263/2631921.html>.

УДК 548.55:535:621.38 + 681.7:535.374

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ LiTaO_3 С ГЕОМЕТРИЕЙ, ОТЛИЧНОЙ ОТ ИДЕАЛЬНОЙ

Варакса Ю.А.¹, Кунц А.В.^{1,2}, Кузнецик В.О.²

¹ОАО «Пеленг»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Проведено математическое моделирование электрооптического модулятора на основе танталата лития при различных отклонениях геометрии устройства от идеальной. Установлено, какие виды отклонений наиболее критичны для работы устройства.

Ключевые слова: модулятор оптического излучения, танталат лития, электрооптика.

MATHEMATICAL MODELING OF AN ELECTRO-OPTICAL MODULATOR BASED ON LiTaO_3 CRYSTALS WITH GEOMETRY DIFFERENT FROM IDEAL

Varaksa Y.¹, Kunts A.^{1,2}, Kuznechik V.²

¹JSC "Peleng"

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A mathematical simulation of an electro-optical modulator based on lithium tantalate was carried out for various deviations of the device geometry from the ideal one. The most critical deviations for the device operation were identified.

Key words: optical radiation modulator, lithium tantalate, electro-optics.

Адрес для переписки: Кузнецик В. О., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: kuznechik@bntu.by

Электрооптический модулятор представляет собой устройство, предназначенное для управления интенсивностью поляризованного оптического излучения с помощью внешнего электрического напряжения.

Целью работы является моделирование электрооптического модулятора на основе танталата лития с целью выявления наиболее критичных для работы устройства отклонений геометрии модулятора от идеальной схемы.

Танталат лития обладает высокой лучевой прочностью и хорошими электрооптическими свойствами, что обуславливают его выбор в качестве основы для активных устройств модуляции добротности твердотельных лазеров. Недостатком данного кристалла выступает присущее ему двулучепреломление, вносящее температурно-зависимую разность фаз между перпендикулярно поляризованными составляющими проходящего излучения даже при нулевом управляющем напряжении. Для компенсации этой разности фаз предложена схема температурной компенсации – два идентичных электрооптических кристалла расположены последовательно и повернуты друг относительно друга на угол 90° вокруг продольной оси (первый на 45° против часовой стрелки, второй на 45° по часовой стрелке) [1]. Такая схема носит название полуволновой, в соответствии с величиной разности фаз, требуемой для полного перекрытия светового пучка поляризатором на выходе устройства. Если заменить второй поляризатор зеркалом, обеспечив двойное прохождение светового пучка через кристаллы, то можно снизить рабочее напряжение в два раза (четвертьволновая схема).

Моделирование модулятора света на основе кристаллов танталата лития, работающего в четвертьволновой схеме, производилось с помощью системы компьютерной математики «Maple». Рассчитывался контраст затвора – основной параметр, характеризующий его применимость для модуляции добротности лазера (отношение максимального пропускания, достигаемого без подачи управляющего напряжения, к минимальному пропусканию, достигаемому при подаче управляющего напряжения) в зависимости от отклонения тех или иных геометрических параметров модулятора от номинальных.

Длина каждого из кристаллов танталата лития при номинальной температуре 20°C принималась равной $7,5\text{ мм}$, сечение представляло собой квадрат со стороной $4,2\text{ мм}$. Модельная длина волны излучения 980 нм [2].

Модель учитывает изменение показателей преломления и размера кристаллов с температурой. Существенное упрощение состоит в том, что термооптические коэффициенты и коэффициенты линейного расширения полагаются не зависящими от температуры, т. е. в исследуемом диапазоне температур (от минус 50°C до плюс 50°C) размеры и показатели преломления меняются линейно.

Максимальное значение сигнал/шум после прохождения модулятора полагалось равным типичному достигаемому на практике значению 1000 (т. е. даже при полном перекрытии излучения модулятором на детекторе имеется шумовая мощность, равная $1/1000$ от мощности падающего сигнала, которая всегда прибавляется к расчетной мощности, пропущенной поляризатором на

детектор). Таким образом, в идеальном случае расчетное значение контраста составит 1001. Степень расчетного понижения контраста по сравнению с идеальным значением характеризует ухудшение функционирования устройства вследствие того или иного отклонения его геометрии от идеальной.

На рисунке 1 показана зависимость контраста от угла поворота кристалла от номинального положения вокруг оптической оси модулятора. Рассмотрены три случая: поворот обоих кристаллов на одинаковый угол в противоположных направлениях, поворот только одного из двух кристаллов, поворот обоих кристаллов в одном направлении. Отметим, что для первых двух случаев падение контраста зависит от температуры кристаллов, причем падение носит осциллирующий характер – при изменении температуры на $1\text{--}2^\circ\text{C}$ контраст может поменяться от максимального значения, близкого к 1000, до минимального значения. Поскольку возможность использования модулятора по всему температурному диапазону определяется минимальным значением контраста, именно минимальные значения и показаны на рисунке 1.

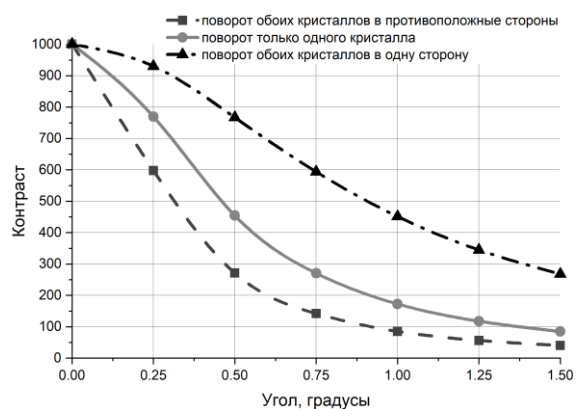


Рисунок 1 – Зависимость контраста от угла поворота кристалла вокруг оптической оси от номинального положения

Была также проведена проверка зависимости контраста от угла отклонения продольной оси кристалла от оптической оси системы в вертикальной плоскости. Как оказалось, отклонение осей обоих кристаллов даже на единицы градусов приводит к падению контраста на доли процента (например, отклонение оси первого кристалла на 6° и второго на минус 6° дает снижение контраста на 10 единиц).

Рисунок 2 иллюстрирует влияние на контраст модулятора точности вырезки кристалла, характеризуемой углом отклонения трех осей оптической индикатрисы относительно геометрических осей кристалла.

Кроме того, была проведена проверка влияния отклонения граней кристаллов от перпендикулярности к оптической оси на значение контраста, и по результатам моделирования при типичных для промышленных кристаллов значениях отклонения от

перпендикулярности ~ 10 угл. мин. значимого ухудшения контраста не наблюдалось.

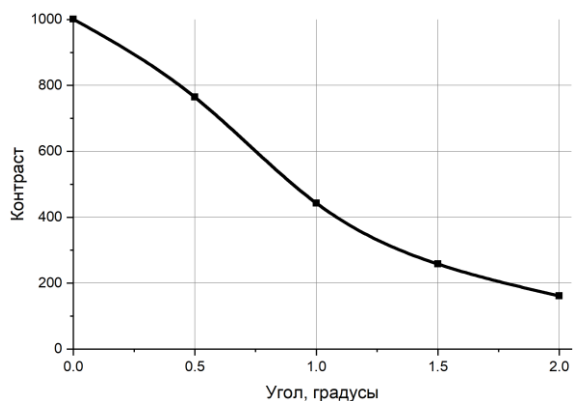


Рисунок 2 – Зависимость контраста от угла поворота осей индикатрисы относительно геометрических осей кристалла

Таким образом, в ходе моделирования были получены следующие основные результаты: отклонение от номинального положения продольной оси

кристаллов в любых направлениях на углы порядка единиц градусов не приводит к заметным изменениям контраста. Отклонение положения оптической индикатрисы на величины порядка одного градуса приводит к падению контраста более чем в два раза. Следовательно, данный параметр должен контролироваться с точностью до угл. минут при вырезании кристаллов. При развороте кристаллов вокруг продольной оси уже на углы порядка десяти угл. мин. происходит значительное падение контраста. Таким образом, данный параметр должен жестко контролироваться при монтаже. Кроме того, технология изготовления и монтажа узла крепления кристаллов должна обеспечивать устойчивость данного параметра во всем рабочем диапазоне температур.

Литература

1. Peters, C.J. Gigacycle-bandwidth coherent-light traveling-wave amplitude modulator / C.J. Peters // Proceedings of the IEEE. – 1965. – Vol. 53, № 5. – P. 455–460.
2. Electro-optic coefficients of lithium tantalate at near-infrared wavelengths / L. Joanna [et al.] // J. Opt. Soc. Am. B. – 2004. – Vol. 21, № 11. – P. 1948–1952.

УДК 621.3.038.825.2

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ $\text{Yb:Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$

Лазарчук А.И., Кисель В.Э., Ясюкевич А.С., Гоман В.И.

НИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследованы спектроскопические характеристики кристалла $\text{Yb:Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$ в поляризованном свете. Измерены спектры поглощения, исследованы кинетики люминесценции, оценено время жизни верхнего лазерного уровня ${}^2\text{F}_{5/2}$ иона иттербия, определены значения поперечных сечений поглощения и стимулированного излучения.

Ключевые слова: спектроскопические свойства, кристалл, трехвалентные ионы иттербия, кинетика затухания люминесценции.

SPECTROSCOPIC PROPERTIES OF $\text{Yb:Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$ CRYSTALS

Lazarchuk A.I., Kisel V.E., Yasukevich A.S., Goman V.I.

Center for Optical Materials and Technologies BNTU

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The spectroscopic properties of the $\text{Yb:Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$ crystal in polarized light were investigated. Absorption spectra were measured, luminescence kinetics were investigated, the lifetime of the upper ${}^2\text{F}_{5/2}$ laser level of the ytterbium ion was estimated, and the absorption and stimulated emission cross sections were determined.

Key words: spectroscopic properties, crystal, trivalent ytterbium ions, kinetics of luminescence decay.

Адрес для переписки: Лазарчук А.И., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: lazartschuk1405@gmail.com

Наличие мощных лазерных диодов InGaAs в спектральной области поглощения ионов Yb^{3+} (940–980 нм) и высокая эффективность лазеров на ионах иттербия стимулировали повышенный интерес к исследованию твердотельных материалов, легированных Yb, для различных типов лазеров, излучающих в спектральном диапазоне около 1 мкм.

Основными достоинствами кристаллов с ионами Yb^{3+} являются: простая схема уровней

энергии (2 мультиплета), что приводит к отсутствию потерь на поглощение из возбужденного состояния, апконверсию, кросс-релаксацию и другие концентрационные эффекты; низкая разница в энергиях квантов накачки и генерации, что сильно снижает тепловыделение в активной лазерной среде; широкая полоса усиления (до 20–30 нм) позволяет генерировать импульсы фемтосекундной длительности.

Также кристаллы с ионами Yb^{3+} характеризуются спектроскопическими характеристиками, удовлетворяющими требованиям для получения эффективной лазерной генерации, и высокой теплопроводностью, что позволяет судить о перспективности их использования в качестве активных сред лазеров с высокой средней мощностью, работающих в спектральных областях около 1 мкм.

В данной работе представлены результаты исследований спектроскопических свойств кристаллов $\text{Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$, легированных ионами иттербия Yb^{3+} .

Для исследований спектров поглощения в поляризованном свете был использован кристалл $\text{Yb}:\text{Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$ с содержанием ионов иттербия 0,5 масс.% ориентированный вдоль главных осей оптической индикатрисы кристалла Ng, Nm, Np. Измерение производилось при комнатной температуре на двухлучевом спектрофотометре Varian CARY 5000 в спектральной области: 800–1150 нм, соответствующей энергетическим переходам ${}^2\text{F}_{7/2} \rightarrow {}^2\text{F}_{5/2}$ ионов иттербия. Спектры для кристалла $\text{Yb}:\text{Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$ представлены на рисунке 1.

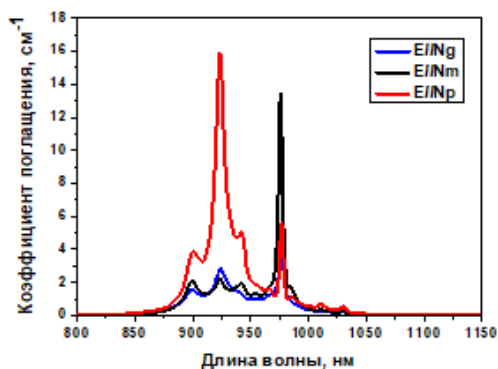


Рисунок 1 – Поляризованные спектры поглощения кристалла $\text{Yb}^{3+}:\text{Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$

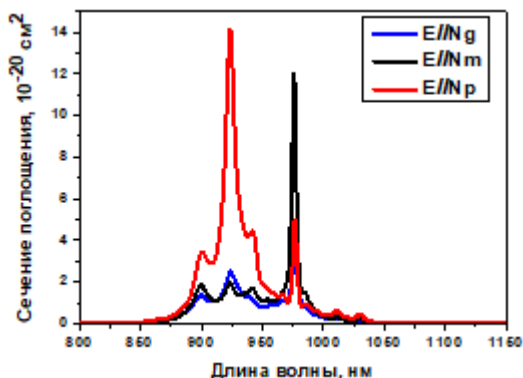


Рисунок 2 – Спектры поперечных сечений поглощения кристалла $\text{Yb}^{3+}:\text{Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$

В спектрах поглощения на длинах волн соответствующих длинам волн лазерных диодов накачки наиболее интенсивная полоса поглоще-

ния наблюдается для поляризации $E//Nm$. Коэффициент поглощения в этом случае составляет $13,5 \text{ см}^{-1}$ на длине волны 975,8 нм с шириной на полувысоте около 4,4 нм.

На рисунке 2 приведены спектры поперечных сечений поглощения кристалла $\text{Yb}:\text{Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$ в спектральной области 800–1150 нм. На длине волны около 976 нм максимальное значение поперечного сечения поглощения составляет $12 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ для поляризации $E//Nm$.

Целью проведения измерений кинетик люминесценции было определение времени жизни возбужденного состояния ${}^2\text{F}_{5/2}$ ионов иттербия в кристалле $\text{Yb}:\text{Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$. Для возбуждения люминесценции использовалась длина волны излучения около 976 нм.

Зависимость времени затухания люминесценции от различного массового содержания кристаллического порошка $\text{Yb}:\text{Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$ в глицериновой суспензии представлена на рисунке 3.

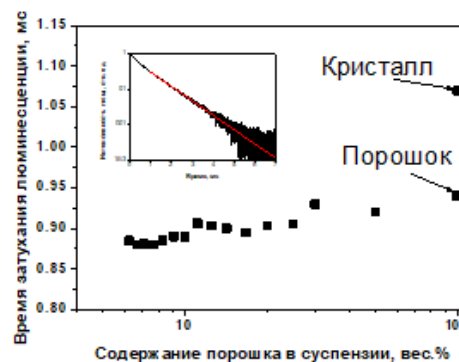


Рисунок 3 – Зависимость времени затухания люминесценции в кристалле $\text{Yb}^{3+}:\text{Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$ от весового содержания порошка в суспензии

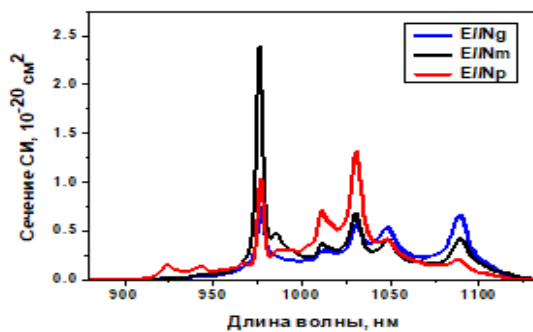


Рисунок 4 – Спектры поперечных сечений СИ кристалла $\text{Yb}^{3+}:\text{Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$

Для всей серии измерений затухание люминесценции в области около 1 мкм хорошо описывалось одноэкспоненциальной функцией (вставка на рисунке 3).

Время жизни флуоресценции уменьшалось с уменьшением концентрации порошка в суспензии. Начиная с определенного содержания порошка, время жизни оставалось постоянным, несмотря на

дальнейшее разбавление, что указывает на незначительное влияние реабсорбции. Измеренные времена затухания люминесценции ионов Yb^{3+} в кристалле $\text{Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$ составляет около 0,885 мс.

Сечения стимулированного излучения рассчитывались с использованием модифицированного метода соответствия, в котором нет необходимости знать структуру энергетических уровней:

$$\sigma_{\text{изл}}^{\alpha}(\lambda) = \frac{3 \exp\left(-\frac{hc}{kT\lambda}\right)}{8\pi n^2 \tau_{\text{рад}} c \sum_{\beta} \int \lambda^{-4} \sigma_{\text{пог}}^{\beta}(\lambda) \exp\left(-\frac{hc}{kT\lambda}\right) d\lambda} \sigma_{\text{пог}}^{\alpha}(\lambda), \quad (1)$$

где α и β – состояние поляризации; c – скорость света; h – постоянная Планка; $\tau_{\text{рад}}$ – радиационное время жизни активного центра; k – постоянная Больцмана; $\sigma_{\text{пог}}^{\alpha}$ – сечение поглощения; n – показатель преломления; T – температура кристалла.

Спектры поперечных сечений стимулированного излучения (СИ) рассчитанные по модифицированному методу соответствия представлены на рисунке 4.

В спектрах поперечных сечений СИ наблюдаются несколько пиков на длинах волн 976, 1010, 1030, 1048 и 1089 нм. Наибольшее значение поперечного сечения СИ составило $2.4 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ на длине волны около 976 нм для поляризации $E//Nm$.

Проведенные исследования спектроскопических свойства кристаллов $\text{Yb}:\text{Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$ свидетельствуют о перспективности их использования в качестве активной среды лазеров спектрального диапазона около 1 мкм, работающих в непрерывном режиме генерации и режиме синхронизации мод.

УДК 681.785.55

СПЕКТРОМЕТР ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА МАЛЫХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ С МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Домацкий А.В., Литвинович Г.С., Хомицевич А.Д., Беляев Б.И.

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

Аннотация. В работе представлены детали разработки спектрометра изображения для изучения влияния излучения Солнца на малые газовые составляющие атмосферы Земли в составе комплекса приборов для установки на борту малого космического аппарата, регистрирующего в том числе информацию о характере солнечных событий в радиодиапазоне и интенсивности генерируемых ионосферных свечений. Представлена оптическая схема, позволяющая получить разрешение не хуже 0,4 нм в спектральном диапазоне работы 306–380 нм и отличающаяся использованием асферических оптических элементов для получения требуемых характеристик при ограниченных габаритах.

Ключевые слова: спектрометр изображения, CubeSat, малые газовые составляющие.

IMAGING SPECTROMETER FOR MONITORING TRACE GAS COMPONENTS FROM SMALL SPACECRAFT

Damaratski A., Litvinovich H., Khomitsevitch A., Beliaev B.

A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The paper presents development details of the image spectrometer to study the influence of solar radiation on the trace gas components of the Earth's atmosphere as part of a device for installation on a small spacecraft board, which also records information about the nature of solar events in the radio range and the intensity of generated ionospheric glows. An optical design makes it possible to obtain a spectral resolution more than 0.4 nm in the spectral range of 306–380 nm and is characterized by the use of aspherical optical elements to obtain the required characteristics in limited dimensions.

Keywords: image spectrometer, CubeSat, small gas components.

Адрес для переписки: Литвинович Г.С., ул. Курчатова 7, г. Минск, 220045, Республика Беларусь
e-mail: litvinovichgs@yandex.by

На сегодняшний день существует большое количество научных миссий по изучению солнечно-земных связей и содержания малых газовых составляющих (МГС) в атмосфере Земли. В большинстве случаев это полноразмерные спутники (группировки спутников) для решения поставленной задачи. Их основной целью является изучение фотохимических процессов преобразования атмосферных МГС, экологический мониторинг, уточнение фотохимических моделей, стра-

тосферно-тропосферный перенос МГС. В частности, для отслеживания антропогенных источников требуется высокое пространственное разрешение и скорость регистрации спектров, что может быть реализовано за счет увеличения габаритов полезной нагрузки и неизбежно влечет за собой удорожание миссии.

Научную ценность имеют геофизические измерения не только с высоким пространственным разрешением и точностью, но также измерения,

проведенные при помощи совокупности приборов, использующие существенно различные физические принципы действия, но нацеленные на изучение общей проблемы.

При выполнении НИОКР «Диагностика 2» по НТП Союзного государства «Комплекс-СГ» будет сделан акцент на изучение влияния излучения Солнца на ионосферу Земли, а именно на оценке параметров воздействия солнечных событий на МГС в стратосфере в совокупности с получением информации о характере солнечных событий в радиодиапазоне и интенсивности генерируемых ионосферных свечений. В такой постановке задачи высокое пространственное разрешение не является необходимостью, однако требование к качеству спектральных данных сохраняется. Наиболее актуальным видится использование спутниковых платформ малой размерности (CubeSat) в виду дешевизны разработки и запуска и, соответственно, возможности глобального покрытия местности за счет большого числа спутников.

В разрабатываемом комплексе будут объединены три прибора в малых габаритах для возможности установки для бюджетные космические аппараты: оптический спектрометр изображения на диапазон 306–380 нм, высокочувствительная оптическая камера с интерференционным фильтром для регистрации линии кислорода на длине волны 762 нм и радиоволновой анализатор, что в совокупности позволит проводить уникальные измерения синхронно для данной области пространства. Параметры МГС, получаемые при помощи спектрометра изображения будут дополнены данными о свечении кислорода в ионосфере, получаемыми при помощи узкополосной камеры, настроенной на длину волны 762 нм, что в совокупности не имеет аналогов среди инструментов полезной нагрузки для малой спутниковой платформы (формат CubeSat). В данной работе освещаются детали разработки спектрометра изображения.

Спектрометр изображения способен получать пространственное распределение спектральной информации вдоль входной щели и построен по оптической схеме (рисунок 1) на вогнутой дифракционной решетке 5 с 1200 штр./мм и фокусным расстоянием 60 мм. Из-за ограничений габаритов был выбран черно-белый детектор 6 типа Ваumer MXUC40.2 формфактора 1" на 4 МПк.

Для минимизации габаритов оптической схемы используется цилиндрическое собирающее зеркало 4 ($R = 125,0$ мм) вместо цилиндрических линз для коррекции астигматизма вогнутой отражающей решетки 5.

Производилась оптимизация частотно-контрастной характеристики объектива с использованием асферических поверхностей для минимизации пространственного разрешения. Использование всего двух линз 1 и 2 позволило

сформировать светосильный объектив, подходящий по своим массогабаритным характеристикам для спутников формата CubeSat. Все линзы объектива выполнены из кварцевого стекла для минимизации ослабления излучения.

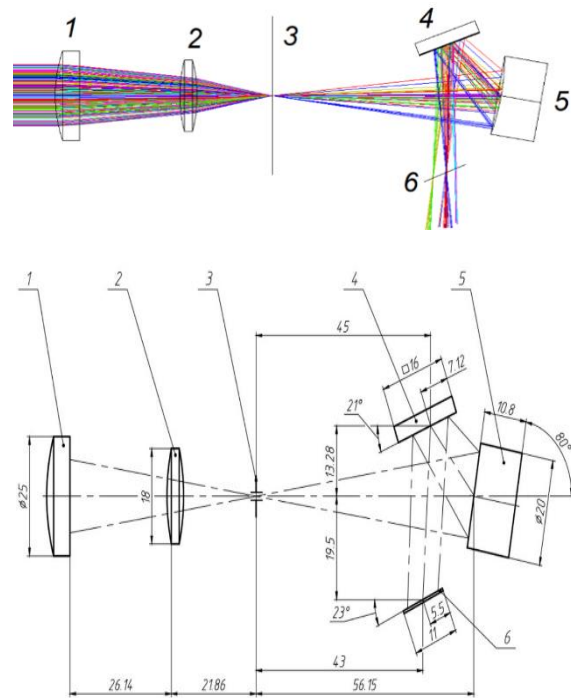


Рисунок 2 – Оптическая схема спектрометра изображения: 1, 2 – линза; 3 – входная щель; 4 – дифракционная решетка; 5 – цилиндрическое зеркало; 6 – детектор;

Оптическая схема спектрометра рассчитывалась в программной среде Zemax, для чего применялся непоследовательный режим, оптимизация параметров оптической схемы проводилась с целью минимизации ширины аппаратной функции для спектрального интервала 306–380 нм и входной щели 5000×25 мкм. Расчетная величина ширины на полувысоте для монохроматической линии – не хуже 0,4 нм для спектрального диапазона 306–380 нм. Расчетное угловое поле зрения спектрометра: $0,03 \times 6^\circ$.

Нерегулируемая входная щель спектрометра собирается вручную, а параллельность и ширина контролируется под микроскопом.

Все оптические элементы оснащены юстировочными устройствами (рисунок 2), позволяющими производить установку элементов с высокой точностью. Доступ к юстировочным устройствам предоставляется через технологические отверстия, что позволяет юстировать спектрометр при закрытой крышке для минимизации постоянных засветок. Корпус из алюминиевого сплава оснащен световым замком для предотвращения проникновения постороннего излучения на детектор.

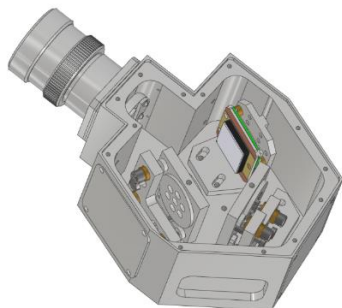


Рисунок 3 – Внешний вид 3D-модели спектрометра без верхней крышки

В процессе юстировки спектрометра будут применены бленды и диафрагмы специальной

формы, полученные путем 3D печати, используемые для поглощения нежелательных порядков дифракции, рассеянного излучения и коррекции формы аппаратной функции.

Итоговая масса макета спектрометра составляет 660 г, а габариты: 162×100×73 мм.

Заключение. Разработан спектрометр изображения на спектральный диапазон в 306–380 нм со спектральным разрешением не хуже 0,4 нм. Расчетное угловое поле зрения составляет $0,03 \times 6^\circ$. Спектрометр предназначен для установки на борту малых космических аппаратов формата CubeSat и позволяет производить регистрацию рассеянного атмосферой солнечного излучения для последующего восстановления содержания малых газовых составляющих.

УДК 535.317.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ ФАРЫ (ПРОЖЕКТОРА)

Град Д.В.¹, Лишик С.И.¹, Челябин А.Е.¹, Фан Ц.²

¹Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси

Минск, Республика Беларусь

²Фуданьский университет

Шанхай, Китайская Народная Республика

Аннотация. Разработана оптическая система лазерной фары (прожектора) и проведено ее моделирование. Определены оптимальные параметры оптической системы лазерной фары, обеспечивающие формирование узкоградусного светового пучка ($3-5^\circ$) при минимальных габаритных размерах оптической части фары и люминесцентного преобразователя 3–5 мм, толщина 1,2 мм.

Ключевые слова: лазерная фара, прожектор, эллиптический рефлектор, оптическое моделирование.

SIMULATION OF THE OPTICAL SYSTEM OF A LASER HEADLIGHT (SPOTLIGHT)

Hrad D.V.¹, Lishik S.I.¹, Chaliapin A.E.¹, Fan J.²

¹Center of LED and Optoelectronic Technologies of the NAS of Belarus

Minsk, Republic of Belarus

²Fudan University

Shanghai, People's Republic of China

Abstract. An optical system for a laser headlight (spotlight) was developed and its simulation was carried out. The optimal parameters of the optical system of the laser headlight were determined, ensuring the formation of a narrow-degree light beam ($2-5^\circ$) with minimal overall dimensions of the optical part of the headlight and the luminescent converter 3–5 mm, thickness 1.2 mm.

Key words: laser headlight, spotlight, elliptical reflector, optical simulation.

Адрес для переписки: Лишик С.И., Логойский тракт, 20, г. Минск, 220090, Республика Беларусь
e-mail: rnd@ledcenter.by

Целью настоящего исследования является определение посредством моделирования оптимальных параметров оптической системы лазерной фары (прожектора), обеспечивающих формирование узкоградусного светового пучка при минимальных габаритных размерах фары и ее основных внутренних элементов.

Оптическая система лазерной фары (прожектора) состоит из лазерного диода накачки ($\lambda = 450$ нм), люминесцентного преобразователя, рефлектора и линзы (рисунок 1).

Люминесцентный преобразователь представляет собой стеклолюминофорную пластинку, конвертирующую лазерное излучение накачки в желто-

красный свет, которые в совокупности воспринимаются наблюдателем как белый свет. В рамках моделирования рассмотрены люминесцентные преобразователи квадратной формы со стороной квадрата β , равной 0,5–10 мм и толщиной 1,2 мм.

В качестве рефлектора использовалась упрощенная модель, представляющая собой фрагмент поверхности эллипсоида с большой a и малой b полуосями, соответственно. Такая форма рефлектора больше подходит для точечных, чем протяженных источников света [1], каковым является люминесцентный преобразователь, но значительно проще с точки зрения изготовления и моделирования. Внутренняя поверхность рефлектора покрыта

светоотражающим материалом с коэффициентом отражения, значение которого принято равным 1. Люминесцентный преобразователь располагается в фокусе F_1 эллиптического рефлектора.

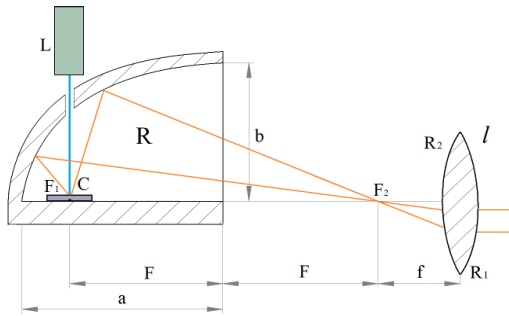


Рисунок 1 – Оптическая система лазерной фары: L – лазер; C – люминесцентный преобразователь; R – рефлектор, l – линза

В качестве линзы использовалась двояковыпуклая или вогнуто-выпуклая собирающая линза. Фокусы F_1 и F_2 эллиптического рефлектора и линзы f располагаются на одной оси, причем один из них (F_2) совпадает с фокусом линзы f . Благодаря вышеописанной конфигурации, лучи света, излучаемые люминесцентным преобразователем, вначале собираются во втором фокусе эллиптического рефлектора, а затем преломляются линзой, формируя узконаправленный пучок.

Подготовка 3D моделей выполнялась в ПО SolidWorks, а оптическое моделирование – в ПО TracPro.

Для оценки эффективности оптической системы лазерной фары определялись угловые расхождения светового пучка в горизонтальной X° и вертикальной Y° плоскостях, соответственно, а также отношение μ количества лучей, достигших виртуального экрана размерами 2×2 м, расположенного на расстоянии 5 м от лазерной фары, к общему количеству испущенных лучей.

Результаты оптического моделирования представлены на рисунках 2–4.

Из анализа рисунка 2 следует, что при увеличении ширины люминесцентного преобразователя β и приближении формы рефлектора к фрагменту сферы (т. е. чем меньше параметр $\Delta = a - b$) расходимость светового пучка Y° увеличивается (аналогично X°).

Из анализа рисунка 3 следует, что с ростом размеров люминесцентного преобразователя β , при значении $\Delta = 7,5$ мм, коэффициент эффективности μ лазерной фары (прожектора) уменьшается, в то время как при $\Delta < 2,5$ мм незначительно растет.

Исходя из вышеприведенных закономерностей можно выделить два варианта реализации оптической системы лазерной фары (прожектора): 1) с большей и 2) меньшей расходимостью светового пучка (рисунок 4).

В первом варианте (рисунок 4, а) оптическая система характеризуется следующими параметрами:

размеры рефлектора $a \times b = 84,5 \times 60$ мм ($F = 59,5$ мм), радиусы кривизны линзы $R_1 = 140$ мм, $R_2 = 60$ мм, $\beta = 3-5$ мм, $\mu \approx 0,5$. Угол расхождения светового пучка составляет около 5° , при этом, а габаритные размеры оптической части фары – 250×90 мм.

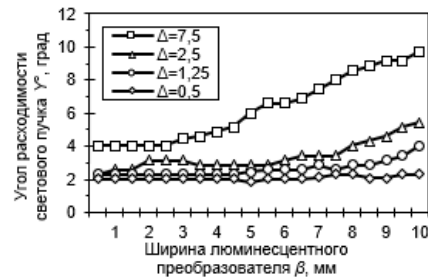


Рисунок 2 – Зависимость расходимости светового потока от ширины люминесцентного преобразователя β и степени эллиптичности рефлектора Δ

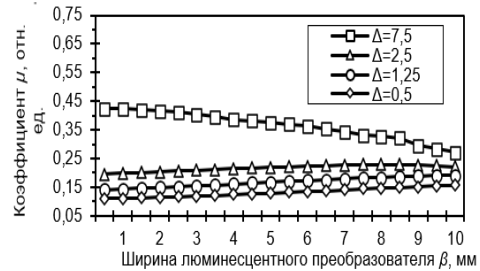


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента эффективности оптической системы μ от ширины люминесцентного преобразователя β и степени эллиптичности рефлектора Δ

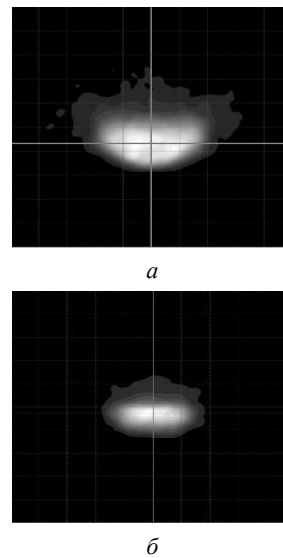


Рисунок 4 – Световое пятно, создаваемое лазерной фарой № 1 (а) и № 2 (б) на экране размерами 2×2 м

Во втором варианте (рисунок 4, б) параметры оптической системы следующие: $a \times b = 36,4 \times 35$ мм ($F = 10$ мм), $R_1 = 90$ мм, $R_2 = -90$ мм, $l = 105$ мм, $\beta = 3-5$ мм, $\mu \approx 0,18$. Угол расхождения светового пучка уменьшается вплоть до $2-4^\circ$, при этом, однако, максимальная яркость светового пятна также уменьшается в 1,5 раза, а габаритные размеры оптической части фары составляют до $141,4 \times 52,5$ мм.

В общем случае первое решение будет более выгодным для использования его в таких случаях как автомобильная фара дальнего света, однако, если необходимым является малое расхождение лучей, то второй вариант имеет большее преимущество.

Литература

1. Jannick, P. Rolland Freeform: Reflector Design With Extended Sources / P. Jannick / Electronic Theses and Dissertations, 2004–2019.

УДК 628.9.037

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ CdS/CdSe КВАНТОВЫХ СТЕРЖНЕЙ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ УСТРОЙСТВ

Острецов Е.Ф., Цвирко В.И., Лишик С.И.

*Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Разработаны и изготовлены люминесцентные композиции на основе CdS/CdSe квантовых стержней, которые наносились в виде пленок на защитное стекло светильника. Показана возможность коррекции и получения стабильных во времени спектров излучения светодиодного светильника.

Ключевые слова: квантовые стержни, светодиодный светильник, спектр излучения, полимерная матрица.

USING CdS/CdSe QR TO CORRECT THE EMISSION SPECTRUM OF LED DEVICES

Ostretsov E.F., Tsvirko V.I., Lishik S.I.

*Center of LED and Optoelectronic Technologies of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Luminescent compositions based on CdS/CdSe quantum rods were developed and manufactured, which were then deposited in the form of films on the protective glass of an LED lamp. This made it possible to obtain stable emission spectra of an LED lamp with the required characteristics.

Key words: quantum rods, LED lamp, radiation spectrum, polymer matrix.

*Адрес для переписки: Острецов Е.Ф., Логойский тракт, 20, г. Минск, 220090, Республика Беларусь
e-mail: rnd@ledcenter.by*

Как известно, использование люминесцентных наночастиц (квантовые точки, стержни (КС) и т. п.) позволяет корректировать спектральные характеристики излучения светодиодных устройств в соответствии с заданными техническими требованиями. Вместе с тем наночастицы характеризуются низкой термостабильностью [1], поэтому их нанесение непосредственно на тепло выделяющие светодиоды не целесообразно. Альтернативным способом является расположение пленок на основе наночастиц на определенном удалении от светодиодов. Апробации данного подхода посвящена настоящая работа.

В качестве образца использовался светодиодный светильник (рисунок 1), конструкция которого позволяла варьировать высоту установки защитного стекла с КС-пленкой над светодиодной платой: 5, 12,5 или 20 мм. Спектр светильника близок к солнечному спектру, что позволяет также оценить эффективность использования КС-пленок, нанесенных на остекление теплиц.

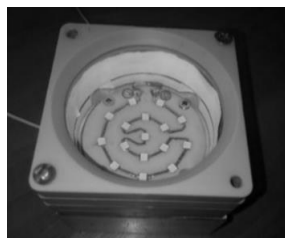


Рисунок 1 – Светодиодный светильник с КС-пленкой, нанесенной на защитное стекло светильника

В качестве полимерной матрицы для получения композиции была выбран прозрачный эластомер Sylgard 182 (Dow Corning), в который вводился раствор красных (626 нм) CdS/CdSe КС, производства компании Planck Innovations (Китай). Приготовленная композиция содержала 0,26 % КС. Пленки формировались методом трафаретной печати на поликарбонатных подложках диаметром 58 мм и толщиной 1 мм. Для получения пленок разной толщины использовались сита № 15, 36 (номер – количество нитей на сантиметр).

Спектры излучения и характеристики светильника измерялись с помощью спектрометрической системы тестирования светодиодных источников света CAS140СТ № 1 при токе питания 100 мА.

В таблице 1 приведены характеристики образцов КС-пленок.

Таблица 1. Характеристики образцов КС-пленок

№ образ	№ сита	Вес компо зиции,	Толщ ина пленк	Конце нтра-ция КС, %	Колич ество КС на стекле
1	15	436	165	0,26	1,134
2	36	122	45	0,26	0,317

На рисунке 2 и в таблице 2 приведены спектры излучения и характеристики исходного светильника (без КС-пленки) при различном удалении защитного стекла от светодиодной печатной платы. Из анализа представленных данных следует, что по мере удаления защитного стекла от светодиодной платы выходная мощность светильника и коррелированная цветовая температура (КЦТ)

уменьшаются, что обусловлено ростом оптических потерь в конструкции светильника.

Таблица 2. Характеристики исходного светильника в зависимости от высоты установки защитного стекла

Высота, мм	Выходная мощность, Вт	ИЦП*	КЦТ, К	Соотношение красный / синий	Состав спектра, С/З/К/ДК**
5,0	1,63	97,5	5140	1,5	23,0/34,3/36,2/6,1
12,5	1,52	97,5	5093	1,5	22,7/36,2/34,6/6,1
20,0	1,38	97,5	5053	1,5	22,4/36,3/34,8/6,1

* – индекс цветопередачи

** – 400–499/500–599/600–699/700–800 нм

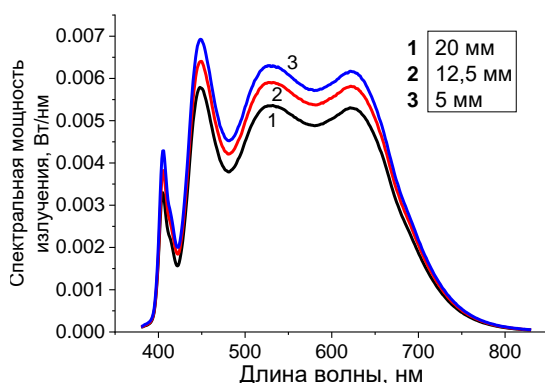


Рисунок 2 – Спектры излучения исходного светильника в зависимости от высоты установки защитного стекла

На рисунке 3 и в таблице 3 представлено сравнение характеристик образцов КС-пленок № 1 и № 2 различной толщины (165 и 45 мкм) с характеристиками исходного светильника.

Таблица 3. Характеристики образцов светильника при высоте установки защитного стекла, равной 20 мм

№ образца	Выходная мощность, Вт	ИЦП*	КЦТ, К	Соотношение красный / синий	Состав спектра, С/З/К/ДК**
Исходн.	1,38	97,5	5053	1,5	22,4/36,3/34,8/6,1
1	1,20	95,9	3815	2,5	16,5/34,8/41,8/6,7
2	1,30	98,4	4675	1,8	20,8/36,1/36,5/6,3

* – индекс цветопередачи

** – 400–499/500–599/600–699/700–800 нм

Результаты, приведенные на рисунке 3 и в таблице 3, демонстрируют снижение КЦТ и повышение доли красного света в спектре излучения светильника. Это означает, что применение КС-пленки

на защитном стекле светильника позволяет корректировать спектральные характеристики светильника, а также солнечного спектра, до требуемых значений для тепличных облучателей.

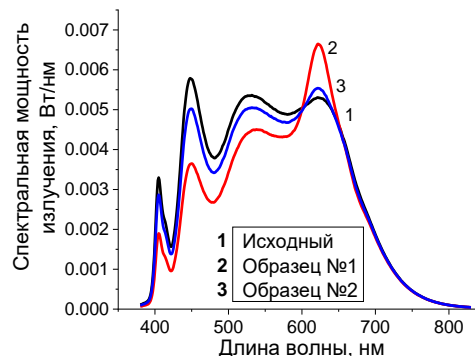


Рисунок 3 – Спектры излучения исходного светильника и светильника с КС-пленками № 1 и 2 (высота установки защитного стекла – 20 мм)

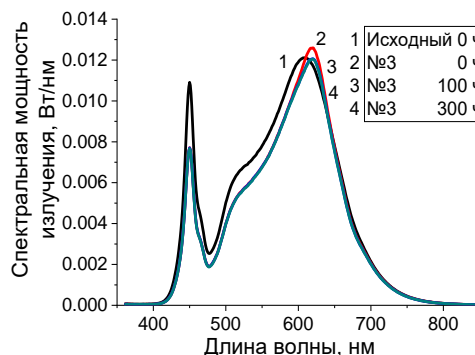


Рисунок 4 – Стабильность спектральных характеристик образца светильника с КС-пленкой № 3

Дополнительно исследовалась стабильность спектральных характеристик КС-пленок в течение 300 ч при токе питания светодиодов 100 мА и высоте установки защитного стекла 5 мм (рисунок 4). Показано, что отклонение характеристик КС-пленки после 100 ч работы составляет $\pm 2\%$.

Заключение. Таким образом, пространственное разнесение КС-пленок и светодиодов позволяет скорректировать спектральные характеристики светильников при сохранении их стабильности во времени.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Договор Т22ТУРЦ-009 БРФФИ–НИЦ - 2022).

Литература

1. Thermally Stable Quantum Rods, Covering Full Visible Range for Display and Lighting Application. Small / M.F. Prodanov [et al.]. – Vol. 17, № 3, 2004487.

УДК 621.785.6:544.032.65:621.3.038.615

МОДУЛЬ АВТОФОКУСИРОВКИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Луцкович З.М., Лапковский А.С., Фёдорцев Р.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассматриваются механизмы упрочнения изделий из металла путем воздействия на них лазерного излучения (лазерная закалка). Представлены способы повышения эффективности лазерной закалки. Расчеты на прочность зубчатого колеса после лазерного упрочнения показали глубину упрочнения металла в приповерхностном слое около 1 мм. Также приведен расчет перетяжки лазерного излучения для достижения необходимой твердости и глубины закалки.

Ключевые слова: закалка, лазерное излучение, крупногабаритные изделия, автофокусировка.

AUTOFOCUS MODULE FOR LASER HARDENING OF LARGE-SIZED PRODUCTS

Lutskovich Z.M., Lapkovsky A.S., Feodortsau R.V.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article discusses the mechanisms of strengthening metal products by exposing them to laser radiation (laser hardening). Methods for increasing the efficiency of laser hardening are presented. Calculations of the strength of a gear after laser hardening showed a depth of metal hardening in the surface layer of about 1 mm. A calculation of the laser radiation waist to achieve the required hardness and hardening depth is also given.

Key words: hardening, laser radiation, large-sized products, autofocus.

Адрес для переписки: Луцкович З.М., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: zlutskovich@gmail.com

Термоупрочнение изменяет свойства материала, увеличивая его сопротивляемость к трению, коррозии, влажности и другим неблагоприятным факторам. Традиционные методы закалки такие как индукционный нагрев или обработка пламенем являются контактными и высокоэнергосодержащими. Поэтому применение лазерной закалки для упрочнения поверхности металлов быстро изнашиваемых высоконагруженных деталей является эффективным методом термообработки.

Процесс полностью управляемый, поэтому лазерное оборудование подходит для упрочнения небольших и геометрически сложных элементов. Около 40 % излучаемой мощности поглощается поверхностью. Высокая температура меняет положение атомов углерода в структуре металла и происходит аустенитное превращение. По мере продвижения луча нагретый слой материала очень быстро остывает. Возникает эффект самоохлаждения. Быстрое снижение температуры предотвращает возврат к исходной металлической структуре. Это приводит к образованию мартенсита и значительному увеличению твердости. Глубина закалки составляет 0,1–1,5 мм, но для некоторых металлов она может быть увеличена до 2,5–3 мм. Выдерживание малых линейных расстояний обеспечивается точностью работы оптической фокусирующей системы в автоматическом режиме с компьютерным программным управлением.

В различных приложениях лазерной оптики при описании пучка излучения используют идеальное приближение, известное как Гауссов

пучок. Интенсивность в таком пучке распределена по закону Гаусса.

Для достижения максимальной эффективности производится расчет перетяжки лазерного пучка, перетяжкой пучка называется минимальный диаметр пучка, интенсивность в пределах которого составляет не ниже 13,5 % максимального значения, где лазерное излучение максимально эффективно.

Гауссово распределение симметрично убывает по мере удаления от центра пятна (центра интенсивности, проиллюстрировано на рисунок 1.

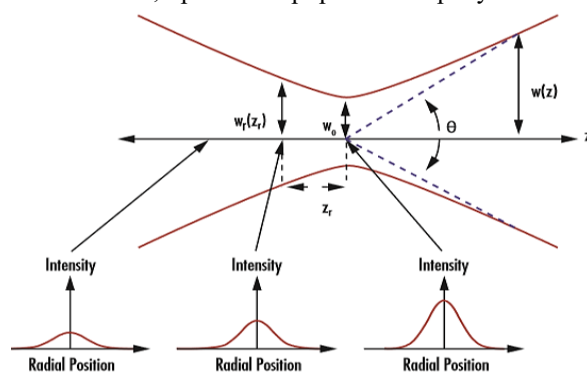


Рисунок 1 – Основные параметры гауссова пучка

Длина перетяжки Z_R определяется по формуле [1]:

$$Z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda},$$

где λ – длина волны лазерного излучения; w_0 – радиус лазерного пучка.

Длина волны поглощения большинства металлов составляет $\lambda = 1064$ нм. Радиус лазерного пучка зависит от выбранной фокусирующей системы.

Автофокусировка лазера происходит благодаря специальному сенсору или электронному устройству, измеряющему расстояние от луча до обрабатываемой поверхности (рисунок 2). Плоскость рабочего стола будет перемещаться вверх или вниз до той поры, пока датчик не определит самое лучшее для раскроя расстояние.

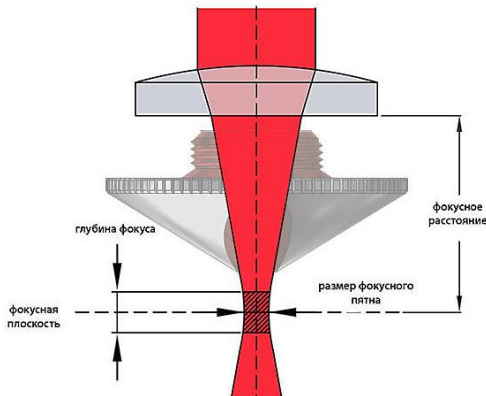


Рисунок 2 – Глубина перетяжки лазерного пучка

В зависимости от предназначения закаливаемых областей детали можно изменять глубину закалки меняя значение перетяжки лазерного пучка. Толщина обрабатываемого материала должна быть больше перетяжки лазерного пучка во избежание образования отверстия.

Лазерный автофокус – довольно интересное и в ряде случаев полезное технологическое решение, которым оснащены отдельные модели ЧПУ-оборудования. Сейчас же рассмотрим плюсы и минусы автофокуса для лазерного станка.

Далеко не всегда на ЧПУ-оборудовании, где режущим или гравирующим инструментом является сфокусированный пучок фотонов, приходится иметь дело с листовым материалом. Очень часто исполнителю необходимо гравировать выпуклые цилиндрические или сферические поверхности, заготовки переменной высоты и другие сложные формы. Соответственно, тут имеют место перепады высот и перманентные смещения фокуса относительно оптимального положения, настроенного предварительно.

В ряде случаев отражения смещения фокусной точки от этого значения сказываются на качестве обработки заготовки. Это может проявляться в неоднородности следов гравировки либо же на качестве торцовых поверхностей или самих краев изделия при резке.

Кроме того, неопытный исполнитель может допустить ошибки в определении оптимального фокусного расстояния при подготовке аппарата к работе. В таких случаях лазерная головка с автофокусом исправит допущенные ошибки, не допустив брака или оптимизируя качество изделия.

Из числа других преимуществ применения системы с автофокусировкой луча можно выделить:

– ускорение общего времени решения производственной задачи. Вынесение человеческого фактора за скобки позитивно сказывается не только на точности, но и на длительности цикла обработки;

– рост срок службы линз. Автофокус лазерного станка оптимизирует расстояние, обеспечивая тем самым работу компонентов в расчетных режимах эксплуатации. Соответственно, выход в режимы с перегревом линзы при должной работе системы охлаждения техники исключается.

Применение лазерного упрочнения широко, оно применяется для повышения износостойкости распредвалов, коленвалов, шестерен заднего моста, рабочих поверхностей клапанов, клапанных седел, поршневых канавок, компрессионных колец, рычагов, матрицы штампов, винты самолетов и других изделий.

При обработке крупногабаритных изделий с переменным рельефом важно поддерживать фокусное расстояние и перетяжку в зоне обработки во избежание недогрева и повторной обработки, что может привести к обратному эффекту и снизить прочность изделия.

Модуль автофокусировки позволит поддерживать постоянное значение перетяжки лазерного пучка в зоне обработки, вне зависимости от рельефа, что увеличит качество и скорость достигаемого результата закалки. Также для ускорения процесса используется сканирующая система, состоящая из двух зеркал, что позволяет образовать площадку из точки лазерного излучения, что также способствует ускорению процесса. Сканирующая система и обрабатываемая поверхность представлена на рисунке 3.

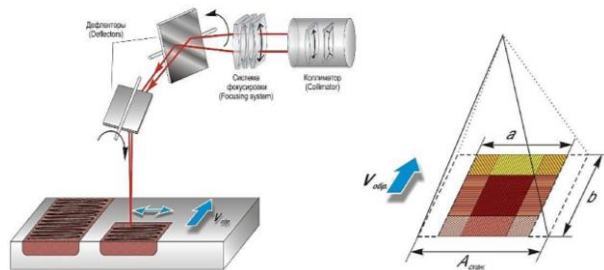


Рисунок 3 – Оптическая сканирующая система и пятно лазерного сканирования

Поверхности, которые выходят из зоны перетяжки прекращают обрабатываться автоматическим изменением обрабатываемой площадки лазерного излучения. За счет оси Z в оптической системе автоматически осуществляется регулирование фокусирующего расстояния для поддержания необходимой перетяжки для обрабатываемого изделия.

Литература

1. Распространение Гауссова пучка: понятие перетяжки пучка, глубины фокусировки, качества пучка, расходимости. INSCIENCE. Научные решения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://inscience.ru/library/article_post/rasprostranenie-gaussova-puchka.

2. Девойно, О.Г. Обеспечение ресурсных параметров ответственных элементов механических трансмиссий с использованием поверхностных слоев, формируемых лазерными технологиями / О.Г. Девойно, И.В. Швец // Теоретическая и прикладная механика:

международный научно-технический сборник / Белорусский национальный технический университет; ред. кол.: А.В. Чигарев (пред. редкол.). – Минск : БНТУ, 2019. – Вып. 34. – С. 266–270.

УДК 618

ФОРМИРОВАТЕЛЬ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА БЕССЕЛЕВА ТИПА С ЗАДАНЫМ ПРОФИЛЕМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ

Макаревич А.П., Варанецкий А.М.

Институт физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработана оптическая схема формирования лазерных пучков бесселева типа, пригодная для дальней оптической связи в свободном пространстве. Изготовлен телескоп формирующий заданный профилем распределения интенсивности пучка в дальней зоне.

Ключевые слова: зеркально-линзовая оптическая система, бесселевы световые пучки, аксикон.

LASER BESSEL-LIKE BEAM FORMER WITH A SPECIFIED INTENSITY DISTRIBUTION PROFILE

Makarevich A.P., Varanetski A.M.

Institute of Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The optical scheme for formation of laser Bessel-like beams used for remote optical communication in free space is developed. The telescope forming a specified intensity distribution profile is manufactured.

Keywords: mirror-lens optical system, Bessel light beams, axicon.

Адрес для переписки: Макаревич А.П., пр. Независимости, 68-2, г. Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: a.makarevich@ifanbel.bas-net.by

Бесселевы световые пучки представляют практический интерес для реализации эффективных систем оптической связи в свободном пространстве на большие дистанции [1; 2]. Для получения требуемого профиля распределения интенсивности пучка в дальней зоне необходима оптическая система заданной кратности с подходящей остаточной аберрацией в уже сформированном кольцевом поле. Ключевыми элементами таких оптических схем являются асферические линзы и аксиконы. Основным недостатком таких оптических систем является относительная сложность и дороговизна изготовления асферических поверхностей большой апертуры, а наличие формирователя кольцевого поля и расширителя пучка в системе существенно удлиняют ее линейный размер.

Перед нами стояла задача разработать формирователь лазерного пучка бесселева типа с заданным профилем распределения интенсивности в дальней зоне (100 км): диаметр пучка 30м; осевая в интенсивность в 1,5–2 раза выше таковой для гауссова пучка; периферия пучка разбита на четыре зоны с заданным процентом энергии в каждой. Проектирование механической части телескопа предполагало свои особенности: габариты системы не должны превышать 130 мм в диаметре и 220 мм в длину; вес не более 5,5 кг; температурная стабильность должна сохраняться от $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$; устойчивость к перегрузкам не хуже 4g.

С учетом данных требований был предложен подход по сокращению линейного размера устройства и замене асферической оптики на сферическую. За счет некоторого усложнения

оптической схемы длину телескопа удалось сократить почти вдвое, существенно уменьшить вес и осуществить компенсацию аберраций одних сферических поверхностей другими до приемлемого уровня. Эволюция конструкции формирователя лазерного пучка проходила по схеме: классическая схема телескопа Кассегрена с параболическим первичным и гиперболическим вторичным зеркалом, схема Максутава со сферическими зеркалами и мениском-компенсатором, оптимизированная зеркально-линзовая схема с плоским зеркалом и одним аксиконом (рисунок 1).

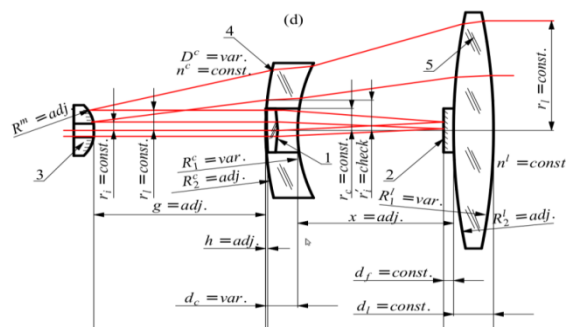


Рисунок 1 – Схема зеркально-линзового формирователя лазерного пучка: 1 – аксикон; 2 – плоское зеркало; 3 – сферическое зеркало; 4 – мениск-компенсатор; 5 – сферическая линза

Для оформления окончательной конструкции зеркально-линзовой оптической схемы мениск-компенсатор был перемещен на место расположения аксикона, который в этом случае вклеивался в отверстие данного элемента, что исключило применение крепежных элементов для него.

При этом материал оптических элементов использовался один и тот же, что существенно уменьшило термические деформации этой пары в широком диапазоне температур. Проблема монтажа плоского зеркала на выходной сферической линзе телескопа решалась аналогично. Для клейки оптических элементов применялся термостойкий малоусадочный клей К300-61.

Ниже в таблице 1 приведен результат расчета основных параметров зеркально-линзовой оптической схемы формирователя лазерного пучка бесселева типа с заданным профилем распределения интенсивности.

Таблица 1. Параметры оптической схемы формирователя лазерного пучка бесселева типа

Фиксируемые параметры			Расчетные параметры		
№ пп	Обозначение	значение, мм	№ пп	Обозначение	значение, мм
1	r_i	3,5	1	R^m	82,0
2	r_0	7,0	2	g	107,5
3	r_l	50,0	3	R^c_2	-2754,0
4	r_c	4,0	4	d_c	9,0
5	d_f	3,0	5	R^c_1	92,9
6	d_l	20,0	6	x	64,03
7	L	200,0	7	R^c_2	579,4
8	l	70,0	8	h	2,0
9	$n^c(\text{SiO}_2)$	1.450	9	R^c_1	-136,14
10	$n^c(\text{TF3})$	1,693	10	D^c	-1/200

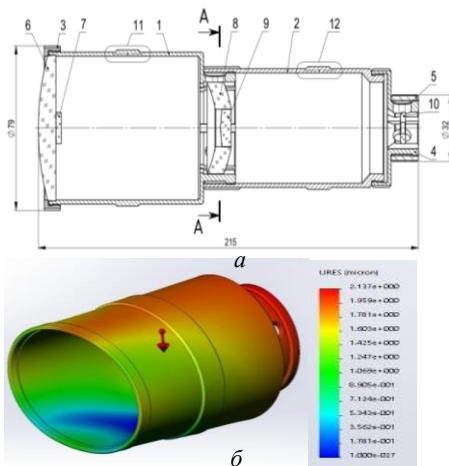


Рисунок 2 – Сборочная схема телескопа (а) и результат расчета на прочность в среде SOLID WORKS (б)

Предъявляемые к механической части телескопа требования выполнялись с применением следующих технических решений:

- ограничения по габаритам и весу – за счет зеркально-линзовой оптической схемы с двукратным поворотом луча (рисунок 1);

- термостабильность – выбором материала корпуса и подбором оптических материалов с взаимной компенсацией влияния температуры;

- устойчивость к перегрузке – конструктивными элементами корпуса с учетом расчета на жесткость и способом крепления оптики;

- устойчивость к перепаду давлений – отказом от полной герметичности конструкции с обеспечением зазоров между элементами для связи с атмосферой;

- юстируемость оптики в ограниченном объеме путем применения наружной оснастки, которая после юстировки и клейки демонтируется и не является частью телескопа.

Подготовленный комплект конструкторской документации включает в себя: пояснительную записку, оптическую схему, геометрический расчет телескопа, расчет на прочность и термостабильность, комплект чертежей оптических элементов и деталей корпуса телескопа с литерой «О»; методику юстировки и методику испытаний.

Корпус телескопа (рисунок 2, а) состоит из двух цилиндрических трубок, большой 1 и малой 2, жестко скрепленных между собой резьбовым соединением. В трубку 1 со стороны большего диаметра с помощью резьбового кольца 3 закрепляется сферическая линза 6 на задней поверхности которой вклеено плоское зеркало 7. Для фиксации линзы 6 в трубе 1 используется гайка 3. Со стороны меньшего диаметра трубки 1 вклеивается мениск-компенсатор 8 с вклеенным в него аксионом 9. Сферическое выпуклое зеркало 10 при помощи клея крепится к крышке 4, которая в свою очередь резьбовым соединением закрепляется в трубке 2. Эластичный клей, устойчивый к большому диапазону температур, предотвращает смещения оптических элементов вследствие перегрузок. Крепление самого телескопа производится посредством выступов 11 и 12, в трубках 1 и 2. Все оптические элементы (кроме линзы 6) имеют возможность юстировки по 5-ти степеням свободы за счет наружной оснастки (на рисунке 2 не показана), связываемой с линзами через съемные винты. После юстировки линзы фиксируются в корпусе телескопа путем подачи клея через технологические пазы трубок 1 и 2. После склеивания винты и оснастка убираются, что позволяет существенно снизить вес телескопа. Технологические отверстия трубки 1 со стороны меньшего диаметра закрываются трубкой 2, технологические отверстия крышки 4 закрываются гайкой 5, одновременно выполняющей и противопопыльную защиту внутреннего объема телескопа.

На основании разработанной конструкторской документации были изготовлены элементы оптической схемы и детали корпуса телескопа, произведена сборка и юстировка. В соответствии с разработанной методикой проведены испытания системы, результаты которых подтвердили правильность выбранного подхода к схемотехнике оптической части и проектированию механической части изделия.

Литература

1. McGloin, D. Bessel beams: diffraction in a new light / D. McGloin, K. Dholakia // Contemporary Physics. – 2005. – V. 46. – P. 15–28.

2. Mphuthi, N. Are Bessel beams resilient to aberrations and turbulence / N. Mphuthi, R. Botha // J. Opt. Soc. Am. – 2018. – V. A 35. – P. 1021–1027.

УДК 623.4.023.43

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ПОТЕРЬ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ
УПРАВЛЯЮЩЕГО СИГНАЛА В ДАЛЬНОМЕРНОМ КАНАЛЕ ТАНКОВОГО ПРИЦЕЛА**

Мандик Н.С.^{1,2}, Фёдорцев Р.В.¹, Нупрейчик А.О.²

¹ОАО «Пеленг»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассмотрены варианты подвода старт-сигнала от лазерного излучателя к фотоприемному устройству с помощью оптического волокна. Проведено сравнение многомодового и одномодового оптического волокна, произведен расчет оптических параметров, а также расчет на потери последних, рассмотрены их преимущества.

Ключевые слова: оптическое волокно, лазерное излучение, потери в оптическом волокне, многомодовое волокно, одномодовое волокно.

**DETERMINING THE LEVEL OF LOSSES IN AN OPTICAL FIBER WHEN TRANSMITTING
A CONTROL SIGNAL IN THE RANGE MEASURING CHANNEL OF A TANK SIGHT**

Mandik N.S.^{1,2}, Feodortsau R.V.¹, Nupreichik A.O.²

¹JSC "Peleng"

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article considers options for supplying a start signal from a laser emitter to a photodetector using an optical fiber. Multimode and single-mode optical fiber are compared, optical parameters are calculated, as well as the calculation of the losses of the latter, their advantages are considered. Keywords: optical fiber, laser radiation, losses in optical fiber, multimode fiber, single-mode fiber.

Keywords: optical fiber, laser radiation, losses in optical fiber, multimode fiber, single-mode fiber.

*Адрес для переписки: Мандик Н.С., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: mandik.nikita@yanex.ru*

В современном мире разработано большое количество лазерных дальномеров, предназначенных для решения различных задач и отличающихся широкими конструктивными конфигурациями для их реализации. Для определения расстояния до объекта исследования с заданной точностью, используют импульсные лазерные дальномеры.

Чаще всего конструкция подобных дальномеров включает в себя импульсные лазеры с оптической коллимирующей системой, на выходе которой образуются оптические импульсы, часть излучения минуя полное расстояние направляется на опорный фотоприемник с импульсным усилителем, а оставшаяся часть импульса, отразившись от объекта исследования, пройдя оптический приемный объектив широкого или узкого поля зрения попадает на фотоприемное устройство (ФПУ), после чего происходит усиление за счет импульсного усилителя и попадает на стоповый вход измерителя временных интервалов (ИВИ). Временной интервал в удобном для изучения виде (аналогом или цифровом) показывает расстояние до объекта на мониторе.

Основной способ подачи старт-сигнала на ФПУ – это блок, состоящий из склейки призм. Минуя полное расстояние, часть сигнала задает старт отсчета [1].

Однако данный метод подачи сигнала имеет свои недостатки: технологические сложности при изготовлении призм связанные с высокой точностью взаимного исполнения отражающих и преломляющих граней; сложность юстировки оптического модуля в процессе сборки; значительные габаритные размеры и вес оптического компонента в составе общей системы.

Альтернативным решением данной задачи является вариант доставки управляющего старт-сигнала через оптическое волокно (ОВ). Ввиду относительно малых габаритов прибора, нам понадобится небольшое количество ОВ, что делает устройство дешевле, также избавляет от сложных манипуляций с юстировкой и размещением узлов прибора, так как за счет гибкости волокна, можно экспериментировать с путями прокладки последнего.

Существует два основных вида ОВ: многомодовое и одномодовое.

По конструкции отличие заключается только в диаметре сердцевины: у многомодовых волокон, она больше длины волны, передаваемых сигналов, в связи с чем по волокну проходит несколько оптических мод (лучей), у одномодовых, сердцевина меньше длины волны сигнала и это позволяет передавать только одну моду.

Для рассмотрения возьмем микроструктурированное оптическое волокно на основе нелегированного кварцевого стекла с гексагональным

расположением отверстий в эпоксикакрилатном защитном покрытии, поддерживающее одномодовый режим распространения излучения.

Таблица 1. Сравнительные технические характеристики

Наименование параметра	QF200 A	SM980-5.8-125
Вид:	многомодовое	одномодовое
Показатель преломления, n	1,467	1,458
D сердцевины, мкм	200±5	10±0,5
D оболочки, мкм	220±6	125±1
Числовая апертура	0,22±0,02	0,13–0,15
Минимальный радиус изгиба при долговременной нагрузке, мм	16/32	>12/25
Затухание, дБ/км	≤10,0 дБ/км	≤2,0 дБ/км
Рабочие длины волн, нм	250–1200	980–1550
Расчетное полное затухание, дБ/км	0,66	0,646
Потери при микроизгибах, дБ	0,1674	0,0007
Потери при макроизгибах, дБ	0,0243	0,0035
Диапазон рабочих температур, °C	–40 до 85	–55 до 85

Многомодовое волокно с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла, оболочкой из кварцевого стекла, легированного фтором, и ступенчатым профилем показателя преломления в однослойном эпоксикакрилатном или металлическом (олово, свинец) защитном покрытии.

Расчет физических параметров и потерь в оптическом волокне проводим по методике, изложенной в источниках [4–6].

Результаты расчетов представлены в сводной таблице значений 1.

Как видно из таблицы 1, у многомодового ОВ полное затухание выше, чем у одномодового, а также потери при микро- и макроизгибах сильнее, что означает, что при проектировании узлов для запуска старт-сигнала лучше использовать одномодовое оптоволокно.

Необходимая часть излучения от источника с полупрозрачного зеркала резонатора, передается непосредственно в фотоприемное устройство (ФПУ) в качестве «опорного сигнала».

Излучение попадает на фотоприемное устройство ФПУ-21ВТ с рабочей длиной волны 1064–1570 нм и с пороговой чувствительностью 50 нВт.

Литература

1. Ефимов, В.О. Вопросы проектирования дальнометрического канала мобильных лазерных локационных систем / В.О. Ефимов, Л.М. Сарварова, А.А. Тяжелова // Инновационная наука. – 2017. – № 08. – С. 15–18.
2. Одномодовое оптическое волокно [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://azimp.ru/thorlabs/single-mode-fiber/41854/#custom_tab.
3. Многомодовое оптическое волокно [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://azimp.ru/thorlabs/polyimide-coated-multimode-fiber/51311/>.
4. Расчет оптических параметров волокон и параметров передачи кабелей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/9094444/page:4>.
5. Расчет оптического волокна [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studbooks.net/719042/tehnika/raschet_opticheskogo_volokna.
6. Расчет оптических параметров и параметров передачи ОВ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://siblec.ru/telekommunikatsii>.

УДК 623.462.122

ЛАЗЕРНО-ЛУЧЕВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОТИВОТАНКОВОЙ РАКЕТОЙ
Козерук А.С.¹, Михалкович Р.Р.¹, Неменёнок А.И.²

¹Белорусский Национальный Технический Университет

²ОАО «Пеленг»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассмотрен принцип работы лазерного канала управления противотанковыми ракетами.

Ключевые слова: ПТРК, ПТУР, управление по лучу лазера, информационное поле, управляемые снаряды.

LASER BEAM ANTI-TANK MISSILE CONTROL SYSTEM

¹Belarusian National Technical University

²JSC "PELENG"

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article discusses the operating principle of the laser control channel for anti-tank missiles.

Key words: ATGM, AMS, laser control, information field, guided missiles.

Адрес для переписки: Михалкович Р.Р., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
 e-mail: roman_mikhalkovich@mail.ru

Введение. Управляемые ракеты используются для поражения движущегося объекта. Их главное преимущество заключается в том, что они могут поражать цели на большом расстоянии и имеют высокую точность поражения. Кроме того, управляемые ракеты могут быть запущены из безопасного расстояния, что уменьшает риск для оператора. Управление движущимся снарядом осуществляется с помощью системы формирования лазерного поля управления, рисунок 1. Эта система формирует в пространстве модулированное лазерное поле управления 6. В силу конструктивных особенностей модуляция излучения в каждой точке поля управления носит индивидуальный характер. В плоскости, перпендикулярной линии визирования, формируется пятно, диаметр которого остается постоянным в каждый момент времени полета ракеты. На управляемой ракете установлен блок приемника 7, который преобразует модулированное излучение с небольшого участка поля 6 в электрический сигнал. Исходя из закона модуляции сигнала, поступающего с фотоприемника 8, блок формирователя команд 9 вычисляет величину смещения ракеты относительно центра поля управления. При этом вырабатывается такой командно-управляющий сигнал для рулевой системы ракеты, чтобы она сместилась к центру поля управления 6. Если же ракета находится в центре поля управления, величина управляющего сигнала равна нулю.

Излучатель. В качестве источника излучения используют лазер 1, работающий в непрерывном режиме генерации с выходной мощностью в несколько ватт в спектральной области около 1 мкм. Если излучение формируется твердотельным лазером с ламповой накачкой, то при проектировании лазерного канала управления следует предусмотреть систему охлаждения 3. Однако в современных

каналах управления в качестве источника излучения используют твердотельные и волоконные лазеры с диодной накачкой, которые характеризуются более низким энергопотреблением, высокой длительностью времени наработки в отказ, пассивной системой охлаждения, а также высоким КПД.

Блок модулятора. Блок модулятора 4 состоит из раstra, электродвигателя и проекционной системы. Растр представляет собой стеклянный диск, на котором соосно нанесены две модуляционные кодовые дорожки – внешняя и внутренняя. Электродвигатель обеспечивает вращение раstra с необходимой частотой. Проекционная система обеспечивает прохождение излучения лазера по двум моделирующим кодовым дорожкам. При совместной работе электродвигателя, раstra и проекционной системы обеспечивается кодирование поля управления 6 по вертикали и горизонтали.

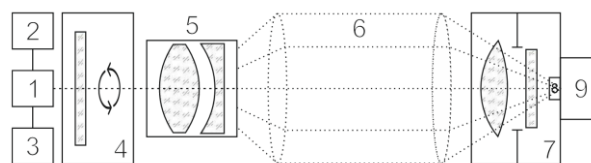


Рисунок 1 – Система формирования лазерного поля управления: 1 – лазер; 2 – источник питания; 3 – система охлаждения; 4 – блок модулятора; 5 – панкратическая система; 6 – поле управления; 7 – блок приемника; 8 – фотоприемник; 9 – блок формирователя команд управления

Панкратическая система. Панкратическая система 5 представлена объективом с переменным фокусным расстоянием. Подвижные компоненты панкратической системы начинают свое движение после выхода ракеты из ствола пушки, поддерживая линейные размеры поля управления 6. Совместная работа лазера 1, блока модулятора

4 и панкратической системы 5 формирует лазерный канал управления и обеспечивает сопровождение управляемой ракеты до цели.

Блок приемника. Блок приемника 7 установлен в хвосте управляемой ракеты. Он включает в себя однолинзовый объектив, диафрагму и ИК-светофильтр. С помощью объектива происходит фокусировка ИК-излучения на площадке фотоприемника 8. Светофильтр предназначен для предотвращения засветки площадки фотоприемника от факела работающей двигательной установки ракеты и солнечного излучения. После преобразования излучения ИК-диапазона в электрические импульсы, сигналы с выхода фотоприемника 8 поступают на блок формирования команд 9. Далее происходит вычисление положения ракеты относительно центра поля управления и вырабатывается соответствующий сигнал на смещение ракеты к центру поля управления 6.

Это означает, что шанс поражения цели близится к 100 %, так как ось поля управления согласована с линией прицеливания.

Заключение. Лазерно-лучевые системы управления представляют собой надежный способ управления ракетой на больших расстояниях. Данная технология позволяет точно наводить ракету на цель, даже если она движется или находится в сложных метеорологических условиях. В целом, лазерный канал управления является одним из ключевых элементов систем управления огнем современной бронетанковой техники.

Литература

1. Ветров, В.В. Основы устройства и функционирования противотанковых управляемых ракет: учебное пособие для вузов / В.В. Ветров. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2006. – 182 с.
2. Прицел-прибор наведения с лазерным дальномером: патент № 2464601.

УДК 53.082.53

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА ДАЛЬНОСТНЫЙ ПОРТРЕТ В ЛАЗЕРНЫХ ЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Кочурова Д.Н.^{1,2}, Калугин А.И.², Антонов Е.А.², Сапожников П.А.¹

¹ФГБОУ ВО ИжГТУ им. М.Т. Калашникова

²УдмФИЦ УрО РАН

Ижевск Российская Федерация

Аннотация. Распознавание объектов является одной из важных задач лазерных локационных систем. Распознавание по дальностному портрету является одним из методов решения этой задачи. Среда распространения – один из искажающих дальностный портрет факторов. В работе рассмотрено влияние на дальностный портрет плоскости и сферы атмосферной неоднородности – дыма.

Ключевые слова: дальностный портрет, распознавание объектов, оптическая локация, атмосферная неоднородность.

INFLUENCE OF ATMOSPHERIC INHOMOGENEITIES ON LASER RANGE PROFILE IN LASER LOCATION SYSTEMS

Kochurova D.N.^{1,2}, Kalugin A.I.², Antonov E.A.², Sapozhnikov P.A.¹

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University

²Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

Izhevsk, Russian Federation

Abstract. Object recognition is one of the important problems of laser ranging systems. Recognition by laser range profile is one of the methods for solving this problem. The propagation environment is one of the factors distorting the range profile. The influence of atmospheric heterogeneity – smoke – on the laser range profile of the plane and sphere is presented.

Keywords: laser range profile, object recognition, optical location, atmospheric heterogeneity.

Адрес для переписки: Кочурова Д.Н., ул. им. Татьяны Барамзиной, Ижевск 34, 426067, Российская Федерация, e-mail: darya310898@gmail.com

Одной из решаемых задач лазерной локационной системы (ЛЛС) является распознавание объектов. Данная задача может решаться несколькими методами [1; 2], включая распознавание по дальностным портретам (ДП) [3]. ДП – электрический сигнал на выходе приемной си-

стемы ЛЛС. Для его получения применяется однопозиционная ЛЛС с моноимпульсным облучением объекта. Он представляет собой зависимость мощности, принятой после отражения от объекта лазерного импульса, от времени. ДП объекта зависит не только от его геометрических

и оптических характеристик, положения в пространстве, но и от начальных параметров лазерного импульса (временная форма и длительность импульса, расходимость пучка и др.). Кроме того, значительное влияние может оказывать условия распространения. Известно, что атмосфера ослабляет сигнал, а также может оказывать влияние на направление распространения и размеры пучка, время его прихода, что приводит к искажению дальностного портрета. Помимо этого, в атмосфере могут присутствовать крупные локальные неоднородности, такие как дым от труб, влияние которых на дальностный портрет необходимо знать. Информация об искажениях, вносимых данными неоднородностями поможет повысить точность распознавания.

Рассмотрим дальностные портреты, полученные от плоскости и сферы, при различных условиях распространения лазерного пучка. Лазерный пучок с длиной волны 1,064 мкм и энергетической расходимостью 0,99 мрад проходит атмосферу (показатель преломления 1,0002733 [4]), отражается от плоскости, вновь проходит атмосферу и приходит в плоскость приемной системы, размеры которой намного больше размеров оптического пучка. Зондируемая плоская поверхность, размерами также намного больше размеров падающего на него лазерного пучка, расположена на расстоянии 1 км от выходного окна ЛЛС. Начальная временная форма импульса представляет собой гауссову форму с шириной импульса на полувысоте 1 нс. Атмосферная неоднородность – «дым», представляет собой параллелепипед с показателем преломления равным $n = 1,5$. Он расположен на расстоянии 500 м от выходного окна лазерной установки и имеет протяженность $L_z = 1$ м вдоль направления распространения пучка и имеет поперечные размеры намного больше размеров пучка. Граница параллелепипеда по одной из поперечных координат расположена на расстоянии 0,1 м от оси пучка таким образом, чтобы через данный участок проходило меньше половины поперечного сечения лазерного пучка (радиус пучка на 500 м примерно равен 0,5 м). Результаты моделирования дальностного портрета, полученного от плоской поверхности, расположенной перпендикулярно оси лазерного излучения, при однородной атмосфере и атмосфере с локальной неоднородностью представлены на рисунке 1.

Дальностный портрет, полученный от плоскости без дыма, представляет собой импульс гауссовой формы длительностью 1 нс (как и посылаемый импульс). Начало приема 6668,5 нс сигнала соответствует тому, что плоскость расположена на расстоянии 1 км. Проанализировав полученные дальностные портреты можно убедиться, что локальная неоднородность оказывает значительное влияние на полученный результат. При введении дыма, дальностный портрет

выглядит как два разнесенных по времени импульса, причем каждый из них имеет гауссову форму с длительностью 1 нс. Кроме того, эти два импульса разнесены в пространстве на величину, равную:

$$t_d = L_z / c(n - n_0), \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме, n_0 – средний показатель преломления окружающей среды.

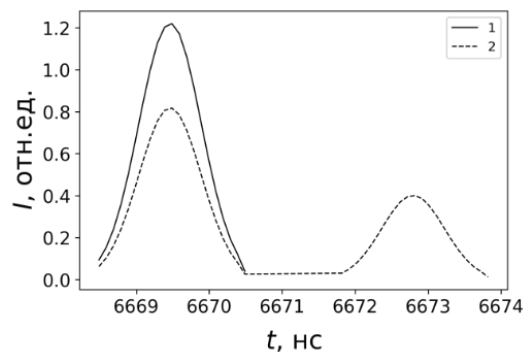


Рисунок 1 – Дальностный портрет плоскости:
1 – однородная атмосфера; 2 – атмосфера с локальной неоднородностью

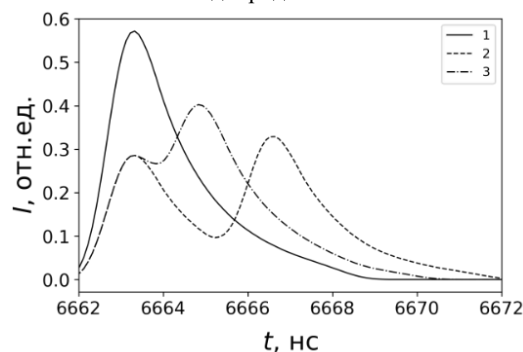


Рисунок 2 – Дальностный портрет сферы:
1 – 0 м; 2 – 0,5 м; 3 – 1 м

Дальностный портрет, полученный в случае с дымом сравним с сигналом, полученным от двух плоскостей [5], разнесенных в однородном пространстве на расстоянии $\approx 0,5$ м. Несмотря на то, что здесь еще можно говорить, что этот объект – плоскость, возникает проблема, связанная с возникновением ложного объекта (вторая часть сигнала). Так как излучение разделяется на две части, то естественно, уменьшается амплитуда зондирующих импульсов, что приводит к снижению мощности принимаемого сигнала, которая при этом может оказаться ниже минимального допустимого уровня.

На рисунке 2 представлены дальностные портреты сферы радиусом 1 м, центр которой расположен на расстоянии 1 км от выходного окна ЛЛС, при трех протяженностях дыма: 0, 0,5 и 1 м. Параметры дыма и лазерного пучка приведены выше. Отметим, что ДП, даже полученный в условиях однородной атмосферы больше не имеет гауссову форму, в отличие от плоскости,

что подтверждает возможность распознавания объектов по их ДП. Аналогично случаю с плоскостью, дальностный портрет сферы при наличии дыма сильно отличается от ДП, полученного в однородной атмосфере. При увеличении протяженности дыма форма сигнала изменяется, он уширяется, и постепенно начинает разделяться на два сигнала. В этом случае сложно определить, что исследуемый объект – сфера. Можно заметить, что по сравнению с плоскостью вторая часть сигнала имеет большую амплитуду. Это объясняется геометрией объектов.

Локальные неоднородности среды сильно искажают дальностный портрет, что может привести к ошибкам распознавания. Но знания об этих влияниях позволяет повысить точность распознавания.

УДК 551.508.762

АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ АМПЛИТУДНЫХ ПРОФИЛЕЙ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ЗОНДИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛИДАРАХ-ОБЛАКОМЕРАХ

Назаренко П.Н.

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

Аннотация. В работе описан алгоритм коррекции амплитудных профилей эхосигнала, регистрируемых биаксиальными метеолидарами. Применение описанного алгоритма позволяет исключить влияние на измеряемые профили коэффициента обратного рассеяния таких факторов как квадрат расстояния, зона неполного перекрытия лазерного пучка и поля зрения приемного канала лидара, неопределенность начала отсчета высоты трассы, другие аппаратные амплитудные и временные параметры прибора. Проводится обсуждение полученных результатов.

Ключевые слова: лидарное уравнение, профиль коэффициента обратного рассеяния, опорный амплитудный профиль.

ALGORITHM FOR CORRECTION OF AMPLITUDE PROFILES OF BACKSCATTERING OF PROBING RADIATION IN LIDARS-CEILOMETERS

Nazarenko P.

SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Technology"
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The paper describes an algorithm for correcting the amplitude profiles of the echo signal recorded by biaxial meteorological radars. The use of the described algorithm makes it possible to exclude the influence on the measured profiles of the backscattering coefficient of such factors as the square of the distance, the zone of incomplete overlap of the laser beam and the field of view of the lidar receiving channel, the uncertainty of the reference height of the path, and other hardware amplitude and time parameters of the device. The results obtained are discussed.

Key words: lidar equation, backscatter coefficient profile, reference amplitude profile.

Адрес для переписки: Назаренко П.Н., пр. Независимости, 78-54, г. Минск, 220012, Республика Беларусь
e-mail: nprn05@mail.ru

Существующие методы измерения профилей коэффициента обратного рассеяния атмосферы лидарами-облакомерами основаны на преобразовании регистрируемых амплитудных профилей эхосигнала в профили коэффициента обратного рассеяния по методу обращения лидарного уравнения [1] с предварительной обработкой получен-

ного массива данных: вычитания фона, нормировки на квадрат расстояния, нормировании на геометрический фактор [2; 3].

Относительный метод измерения профилей коэффициента обратного рассеяния, предложенный в [4], позволяет нормирование амплитудных профилей на квадрат расстояния и геометриче-

Литература

1. Алгоритм лазерной локации и распознавания объектов по трехмерному изображению / В.Н. Легкий [и др.] // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. – Т. 8. – С. 146–152.
2. Le, H. Semiconductor Laser Multi-Spectral Sensing and Imaging / H. Le, Y. Wang // Sensors (Basel, Switzerland). – 2010. – Vol. 10.
3. Баулин, Ф.Б. Проблемы формирования систем, обеспечивающих автоматическое распознавание объектов по дальностным портретам / Ф.Б. Баулин, Е.В. Бурый // Компьютерная оптика. – 2019. – 43, № 1. – С. 5–13.
4. Mathar, R.J. Refractive index of humid air in the infrared: model fits / R.J. Mathar // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. – 2007. – Vol. 9, № 5. – P. 470–476.
5. Co-path full-waveform LiDAR for detection of multiple along-path objects / D. Li [et al.] // Optics and Lasers in Engineering. – 2018. – Vol. 111. – P. 211–221.

ский фактор заменить на нормирование на амплитудный профиль опорного сигнала. Уравнение профиля коэффициента обратного рассеяния $\beta_{из}(z)$ приобретает вид:

$$\beta_{из}(z) = \frac{\left[\frac{\alpha_0}{S_0} \cdot F(z) \right]}{\left[(\exp[2\alpha_0 z]) \times \left[\times (1 - 2\alpha_0 \frac{S_{из}}{S_0} \int_0^z (F(z) \exp[-2\alpha_0 z] dz) \right] \right]}, \quad (1)$$

где $\alpha_{из}(z)$ и α_0 – коэффициенты экстинкции на высоте z измеряемой и опорной трассы; $S_{из}(z)$ и $S_0(z)$ – лидарные отношения на высоте z измеряемой и опорной трассы; z – высота; $F(z)$ – относительная функция профиля мощности обратно рассеянного излучения. Описывается выражением:

$$F(z) = \frac{P_{из}(z) - P_{физ}}{P_0(z) - P_{фо}}, \quad (2)$$

где $P_{из}(z)$ и $P_0(z)$ – мощности обратно рассеянного измеряемого и опорного излучения на высоте z , соответственно; $P_{физ}$ и $P_{фо}$ – мощности фоновой засветки на измеряемой и опорной трассах, соответственно.

Алгоритм коррекции (расчета) атмосферного профиля коэффициента обратного рассеяния по методу [5] состоит из последовательности действий, представленных ниже:

1. Определение метеорологической оптической дальности (МОД) и, соответственно, коэффициента экстинкции атмосферы α_0^* на момент регистрации опорного профиля эхосигнала по данным метеорологических станций или по данным нефелометров, работающих совместно с облакомером.

2. Измерение и формирование массива данных результатов измерений за период наблюдения мощности оптического эхосигнала для опорной атмосферной трассы $M_1 (P_0(1), \dots, P_0(i), \dots, P_0(n))$. Число используемых ячеек памяти n равно отношению $z_{max}/\Delta z = 2000$, где $z_{max} = 10\,000$ м – верхняя точка диапазона измерений (максимальная высота); $\Delta z = 5$ м – интервал дискретизации измерений по высоте. Порядковый номер ячейки i соответствует определенному значению $P_0(i)$, где i – номер отсчета.

3. Создание нового массива $M_1^*(P_0^*(1), \dots, P_0^*(i), \dots, P_0^*(n))$ из массива M_1 посредством его вычитания из данных $P_0(i)$ фоновой засветки, определяемой как:

$$P_{фо} = (\sum_{n=400}^n P_0(i))/400. \quad (3)$$

Новые данные, входящие в массив M_1^* , определяются выражением:

$$P_0^*(i) = P_0(i) - P_{фо}. \quad (4)$$

4. Определение метеорологической оптической дальности (коэффициента экстинкции $\alpha_{из}^{**}$) атмосферы на момент регистрации измеряемого профиля эхосигнала по данным метеорологических станций или по данным нефелометров, работающих совместно с облакомером.

5. Измерение и формирование скользящего массива данных результатов измерений за период наблюдения мощности оптического эхосигнала для опорной атмосферной трассы

$$M_2 (P_{из}(1), \dots, P_{из}(i), \dots, P_{из}(n)).$$

Число используемых ячеек памяти n равно отношению $z_{max}/\Delta z$, где z_{max} – верхняя точка диапазона измерений (максимальная высота); $\Delta z = 5$ м – разрешающая способность по дальности. Порядковый номер ячейки соответствует определенному значению $P_{из}(i)$.

6. Создание нового массива

$$M_2^* (P_{из}^*(1), \dots, P_{из}^*(i), \dots, P_{из}^*(n))$$

из массива M_2 посредством вычитания из данных $P_0(i)$ фоновой засветки, определяемой как:

$$P_{физ} = (\sum_{n=400}^n P_{из}(i))/400. \quad (5)$$

Новые данные, входящие в массив M_1^* , определяются выражением:

$$P_{из}^*(i) = P_{из}(i) - P_{физ}. \quad (6)$$

7. Создание нового массива

$$M_3 (F(1), \dots, F(i), \dots, F(n))$$

из массивов M_1^* и M_2^* , где $F(i)$ рассчитываются по формуле:

$$F(i) = \frac{P_{из}(i) - P_{физ}}{P_0(i) - P_{фо}}. \quad (7)$$

8. Создание нового массива

$$M_4 (I(1), \dots, I(i), \dots, I(n))$$

из массива M_3 , где $I(i)$ рассчитывается по формуле:

$$I(i) = \Delta z \sum_1^i F(i) \exp(-2\alpha_0^{**}(i-1)\Delta z). \quad (8)$$

9. Определение порогового числа отсчетов $i_{пор}$, выше которого разность последующих значений интеграла и его порогового значения $(I(i_{пор} + 1, \dots, n) - I(i_{пор}))$ равна нулю или меньше допуска δ . Допуск δ задается индивидуально для каждого прибора в процессе наладки на уровне $\pm 0,05 \dots 0,1 I(i_{пор})$. При условии $I(i + 1, \dots, n) - I(i) \geq \delta$ вертикальная видимость не рассчитывается.

10. Определение отношения $S_{из}/S_0$ в соответствии с уравнением:

$$(S_{из} / S_0)^{**} = \frac{\alpha_{из}^{**}}{\alpha_0^{**} F(i^*)}. \quad (9)$$

где $F(i^*)$ – среднее значение $F(i^*)$ для отсчетов от 1 до i^* , соответствующих высотам от 0 до z^* ;

11. Создание массива коэффициентов обратного рассеяния измеряемого атмосферного профиля $M_5 (B_{из}(1), \dots, B_{из}(i), \dots, B_{из}(n))$ из массива M_4 , где $B(i)$ рассчитываются как:

$$B(i) = \frac{\left(\frac{\alpha_0^{**} F(i)}{S_0}\right)}{[(\exp[2\alpha_0^{**} z])(1 - 2\alpha_0^{**} I(i)(S_{из}/S_0))]} \quad (10)$$

Определение нижней границы облаков, положения атмосферных пиков облаков, вертикальной видимости при необходимости.

УДК 535.3

ДИХРОИЧНОЕ ЗЕРКАЛО В ПРИБОРЕ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ

Неваев А.Е., Войтов А.С.

ГБПОУ «Новосибирский авиационный технический колледж имени Б.С. Галушчака»
Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация. Приборы ночного видения уже несколько десятилетий занимают важную роль в оптическом приборостроении. В данной работе представлено усовершенствование оптической схемы за счет использования дихроичного зеркала.

Ключевые слова: приборы ночного видения, дихроичное зеркало.

DICHROIC MIRROR IN NIGHT VISION DEVICES

Nevaev A., Voitov A.

GBPOU "Novosibirsk Aviation Technical College named after. B.S. Galushchak"
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. Night vision devices have played an important role in optical instrumentation for several decades. This paper presents an improvement in the optical design through the use of a dichroic mirror.

Key words: night vision devices, dichroic mirror.

Адрес для переписки: Неваев А.Е., ул. Красный проспект, 70, г. Новосибирск, 630091, Российская Федерация
e-mail: SashkaNeway@gmail.com

Цели. Исследование дихроичного зеркала в приборах ночного видения. Перспективы его использования.

Введение. Дихроичное зеркало представляет собой стеклянную подложку с нанесенной многослойной диэлектрической структурой, которая за счет эффекта интерференции отражает только одну длину волны рисунок 1.

Основная часть. Дихроичное зеркало в приборе ночного видения – важный компонент, отвечающий за обеспечение оптимальной передачи и отражения световых волн при использовании данного прибора. Эта технология позволяет получить высококачественное изображение в условиях слабой освещенности или полной темноты.

Основным принципом работы дихроического зеркала является использование его свойства пропускать или отражать световые волны в зависимости от их определенной длины. Таким образом, с помощью данного зеркала удастся отфильтровать или усилить нужные кусочки электромагнитного спектра.

Литература

1. Klett, J.D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns / J.D. Klett // Applied Optics. – 1981. – Vol. 20, № 2. – P. 211–220.
2. Determination of overlap in lidar systems / J. Vande Hey [et al.] // Applied Optics. – 2011. – Vol. 50, № 7. – P. 5791–5797.
3. Analytical function for lidar geometrical compression form-factor calculations / Kamil Stelmaszczyk [et al.] // Applied Optics. – 2005. – Vol. 44, № 7. – P. 1323–1331.
4. Относительный метод калибровки одноволновых биаксиальных аэрозольных метеолидаров / В.И. Беляковский [и др.] // Опто-, микро и СВЧ-электроника: сб. ст. 11 Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 21–23 сент. 2022). – 2022. – С. 130–137.

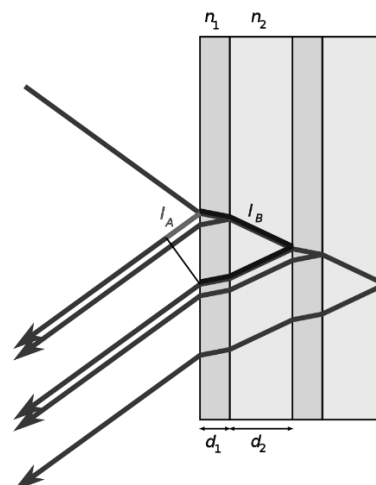


Рисунок 1 – Принцип работы интерференционного зеркала: n_1 – тонкие слои материала с более высоким показателем преломления; n_2 – толстые слои с меньшим показателем преломления; l_A и l_B – оптические длины пути

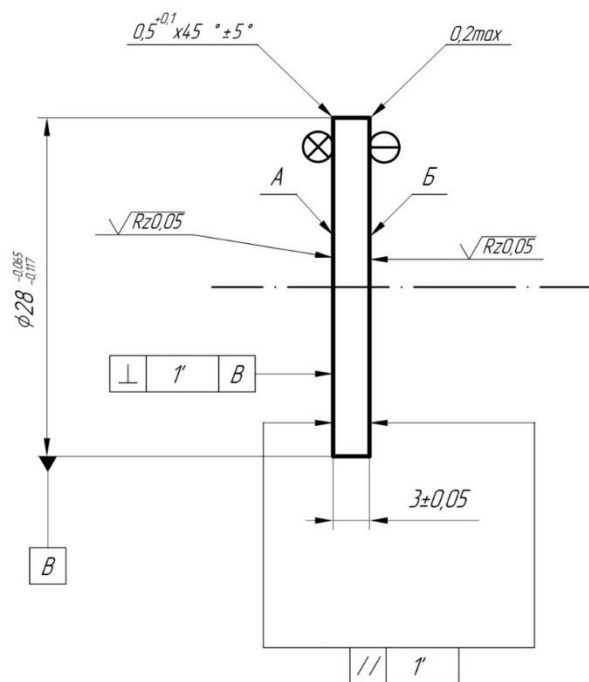


Рисунок 2 – Оптическая схема дихроичного зеркала

В приборе ночного видения, такое зеркало позволяет отделить инфракрасные волны от видимого света. Это особенно важно, поскольку инфракрасное излучение, генерируемое предметами исследования, не видно невооруженным глазом. Однако оно может быть обнаружено и преобразовано в видимый сигнал с помощью детекторов инфракрасного излучения.

Дихроичное зеркало в приборе ночного видения также обеспечивает оптимальное использование доступного света или инфракрасного излучения. Оно способно отражать нужную длину волны, уменьшая потери световой энергии и повышая общую чувствительность прибора.

Еще одно важное преимущество дихроичского зеркала заключается в его прозрачности для остальных спектральных компонентов. Это означает, что в то время, как инфракрасные волны отображаются и преобразуются в видимую форму, другие виды светового излучения продолжают проходить через зеркало без значительных потерь. Это обеспечивает точность и надежность при передаче и обработке изображения.

Таким образом, дихроичное зеркало в приборе ночного видения является важным элементом, обеспечивающим высокое качество и эффективность системы. Благодаря его свойствам фильтрации и отражения, прибор обеспечивает оперативную и точную передачу визуальной информации

в условиях недостаточного освещения. В результате можно получить яркое и четкое изображение объектов даже в полной темноте, что делает эту технологию незаменимой при выполнении различных задач – от наблюдения за окружающей средой до специальных операций и деятельности в сложных условиях. Оптическая схема зеркала представлена на рисунке 3.

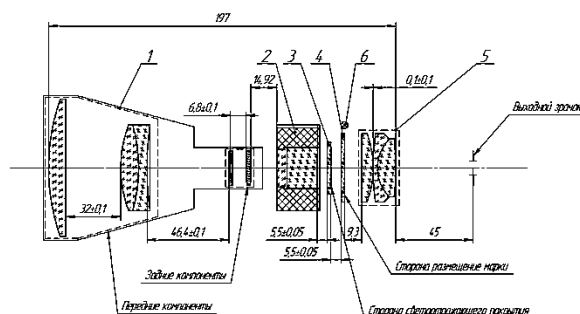


Рисунок 3 – Оптическая схема прицела ночного видения с дихроичным зеркалом: 1 – объектив; 2 – электронно-оптический преобразователь (ЭОП); 3 – дихроичное зеркало; 4 – сетка; 5 – окуляр

Компоновка оптической схемы прицела ночного видения с дихроичным зеркалом рисунок 3. Объектив, позиция 1, предназначен для получения перевернутого увеличенного изображения наблюдаемого объекта, состоит из передней и задней части. Электронно-оптический преобразователь (ЭОП) III поколения позиция 2. Дихроичное зеркало, позиция 3, установлено между ЭОПом и сеткой. За ним установлена сетка с подсветкой 4, после сетки с подсветкой устанавливается окуляр 5 через который мы наблюдаем изображение.

Окуляр, позиция 5, представляет собой многолинзовую конструкцию и предназначен для рассматривания увеличенного прямого изображения цели и прицельной сетки.

Заключение. В данной работе проведено исследование дихроичного зеркала в прицеле ночного видения, назначение, структура, принцип работы, сделана компоновка прибора с исследуемым компонентом. В процессе проведения работы было принято решение о дальнейшем усовершенствовании конструкции прибора.

Литература

1. Степанов, Е.В. Квантовая электроника. – 2002. – Т. 32, № 11.
2. Бардин, А.Н. Сборник и юстировка оптических приборов / А.Н. Бардин. – Высшая школа, 2005. – 325 с.
3. Кривовяз, Л.М. Практика оптической измерительной лаборатории / Л.М. Кривовяз, Д.Т. Пуряев, М.А. Знаменская. – Машиностроение, 2004. – 333 с.

УДК 621.373.826

ХАРАКТЕРИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО Nd:YAG ЛАЗЕРА В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Орехова В.Е.¹, Кисель В.Э.², Орехов К.А.¹¹ОАО «Пеленг»²Научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий БНТУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследованы выходные характеристики прототипа импульсного лазера на кристалле иттрий-алюминиевого граната с ионами Nd³⁺ (Nd:YAG) с диодной накачкой, излучающего на длине волны 1064 нм, для применения в составе дальномеров авиационного базирования. Представлены результаты измерений энергии импульсов лазера для частот следования 1; 4; 12,5; 22 Гц в течение цикла длительностью 2 мин в диапазоне температур окружающей среды от –40 до +60 °С. Для исследованных частот следования импульсов и температур окружающей среды значения энергии лазерных импульсов составляют не менее 80 мДж при величине энергии импульса накачки не более 0,51 Дж, расходимость лазерного излучения не превышает 1,9 мрад.

Ключевые слова: диодная накачка, Nd:YAG кристалл, расходимость.

CHARACTERISTICS OF A PULSED Nd:YAG LASER EMISSION OVER WIDE AMBIENT TEMPERATURE RANGE

Orekhova V.¹, Kisel V.², Orekhov K.¹¹JSC "Peleng"²Optical Materials and Technology Research Center of BNTU
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The output characteristics of a diode-pumped pulsed laser prototype based on Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet (Nd:YAG) crystal emitting at a wavelength of 1064 nm are examined for use as part of airborne rangefinder. Results of laser pulse energy measurements are presented within 2 min cycle for pulse repetition rates 1, 4, 12.5, 22 Hz at ambient temperature range from –40 to +60 °C. For the studied pulse repetition rates and ambient temperatures the pulse energy values are not less than 80 mJ for pump pulse energy less than 0.51 J, laser beam divergence does not exceed 1.9 mrad.

Key words: diode pumping, Nd:YAG crystal, divergence.

Адрес для переписки: Орехова В.Е., ул. Макаёнка, 25, г. Минск, 220114, Республика Беларусь
e-mail: ve.orehova@gmail.com

Импульсные лазеры на основе кристалла Nd:YAG с изменяемой частотой следования импульсов от 1 до 20–30 Гц имеют широкое использование в качестве передающей части лазерного дальномера на борту вертолетов или беспилотных летательных аппаратов [2–4; 8; 9]. Разработка лазера требует сохранения выходных параметров прибора в течение цикла из серии импульсов при различных частотах следования, а также в широком диапазоне температур окружающей среды и при воздействии вибраций.

Целью исследования являлась экспериментальная проверка энергетических характеристик разработанной схемы лазерного резонатора и квантрона с диодной накачкой кристалла Nd:YAG для лазера, работающего в режиме модуляции добротности в широком диапазоне температур окружающей среды при минимальном значении энергии лазерного импульса 80 мДж на длине волны 1064 нм и расходимостью не более 2 мрад.

Исследована оптическая схема резонатора на основе линейной П-образной конфигурации с трипель-призмой и квантроном на основе цилиндрического кристалла диаметром 4 мм с поперечной диодной накачкой. Выбранная оптическая схема приведена на рисунке 1.

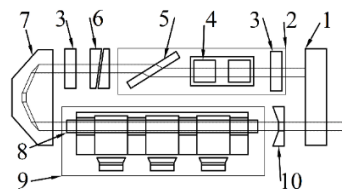


Рисунок 1 – Оптическая схема лазера излучателя:
1 – глухое и выходное зеркала на одной подложке;
2 – электрооптический затвор; 3 – четвертьволновая пластинка; 4 – ячейка Поккельса; 5 – поляризатор;
6 – юстировочные клинья; 7 – трипель-призма;
8 – активный элемент; 9 – квантрон; 10 – защитная диафрагма активного элемента

Резонатор на границе устойчивости длинной 450 мм образован двумя плоскими глухим и выходным с коэффициентом отражения $R = 25\%$ зеркалами, выполненными на одной подложке, и трипель-призмой. Работу в режиме активной модуляции добротности обеспечивает электро-оптический затвор, состоящий из поляризатора, ячейки Поккельса на основе кристаллов РКТР и четвертьволновой фазовой пластинки. Для компенсации набега фаз, возникающего в поляризованном излучении в резонаторе в результате прохождения через трипель-призму, в резонатор

дополнительно установлена четвертьволновая пластина. Юстировка резонатора производится поворотами вокруг оптической оси пары равных по величине оптических клиньев. Резонатор излучателя помещен в герметичный корпус, излучение выводится через защитное стекло.

Квантрон с поперечной диодной накачкой состоит из механически развязанных узла матриц лазерных диодов и узла медного отражателя с активным элементом. Узел матриц накачки представляет тонкую медную пластину с закрепленными на ней датчиком температуры и тремя матрицами лазерных диодов суммарной максимальной оптической мощностью 2400 Вт на длине волны около 808 нм. С внешней стороны на теплостоке матриц установлен элемент Пельтье. Использование элемента Пельтье при работе лазера позволяет стабилизировать температуру теплостока лазерных диодных матриц и обеспечить стабильность спектрального состава излучения накачки. Активный элемент квантрона на основе кристалла Nd:YAG с концентрацией ионов Nd^{3+} 0,9 ат.%, диаметром 4 мм и длиной 70 мм имеет полностью кондуктивное охлаждение через боковую поверхность. Контакт поверхности активного элемента и поверхностей деталей узла отражателя обеспечивается через слой кремнийорганического теплопроводящего материала. Детали узла отражателя выполнены таким образом, что отведение тепла с боковой поверхности кристалла происходит через 4 цилиндрические области длиной не менее 5 мм, расположенные между тремя областями боковой поверхности кристалла, напротив которых расположены матрицы накачки, а также возле торцов кристалла.

Конфигурация резонатора и конструкция квантрона были выбраны с целью реализовать компактный лазер с высоким оптическим КПД без применения дорогостоящих технологий для серийного производства.

В таблице 1 приведены усредненные значения энергии и максимальные полученные значения энергетической расходимости по уровню $1/e^2$ для энергии импульса накачки 0,49 Дж в течение цикла следования импульсов длительностью 2 мин при температуре +25 °С.

Таблица 1. Выходные характеристики лазера при температуре +25 °С

Частота следования лазерных импульсов	1	4	12,5	22
Средняя энергия, мДж	81,2	84,0	85,6	82,3
Стандартное отклонение энергии, мДж	1,3	0,5	1,5	2,1
Максимальная расходимость, мрад	1,2	1,2	1,5	1,8

Проведены измерения энергии и расходимости лазерных импульсов при помещении в термокамеру. Исследования проводились при температуре окружающей среды от -40 до +60 °С при стабилизации температуры теплостока матриц лазерных диодов при $35 \pm 0,5$ °С, соответствующей оптимальной центральной длине волны спектра излучения накачки.

Расходимость во всем температурном диапазоне не превышает 1,9 мрад. Усредненные значения энергии лазерных импульсов в течение цикла длительностью 2 мин приведены на рисунке 2.

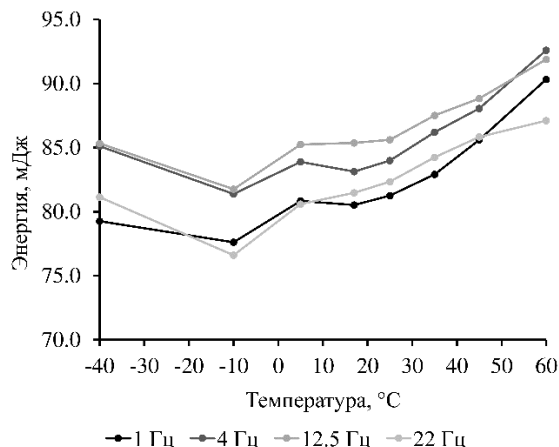


Рисунок 2 – График зависимости среднего значения энергии лазерных импульсов от температуры окружающей среды для частот следования импульсов 1, 4, 12,5, 22 Гц для циклов длительностью 2 мин

Для температур -10, -40 °С энергия лазерных импульсов понижена из-за температурного сдвига длины волны источника накачки в результате охлаждения его теплостока. Энергия импульса может быть повышена до 80 мДж при увеличении энергии импульса накачки до 0,51 мДж. Тогда для всех исследованных частот следования лазерных импульсов энергия лазерного импульса достигает значения 80 мДж менее чем через 2 с после начала работы лазера.

Литература

- Richardson, M. Laser systems overview: General / M. Richardson // Airborne Laser Systems Testing and Analysis / Dr. Mark A. Richardson. – Swindon, 2010. – Ch. 2.1.
- Laser Range Sensors / K.C. Bahuguna [et al.] // Defence Science Journal. – 2007. – Vol. 57, № 3. – P. 881–890.
- Military reconnaissance platform for the spectral range from the visible to the MWIR / M. Gerken [et al.] // Infrared Technology and Applications XLIII: Proc. of SPIE Vol. 10177, Infrared Technology and Applications XLIII, Anaheim, 9–13 may 2019.

УДК 621.373.826

ПРЕЦИЗИОННОЕ ЛАЗЕРНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ СТРУКТУР НА ПЛАСТИНАХ САПФИРА

Петухов И.Б., Ретюхин Г.Е.

ОАО «Планар-СО»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Проведены исследования и подбор технологических режимов лазерного скрайбирования пластин сапфира толщиной 100 мкм с использованием импульсного волоконного наносекундного лазера с длиной волны 355 нм и средней мощностью излучения 3 Вт и частотой следования импульсов 300 кГц для создания изделий электроники.

Ключевые слова: импульсный волоконный лазер, лазерная абляция материалов, скрайберный рез, плотность потока излучения, сапфировые подложки (пластины).

PRECISION LASER SEPARATION OF STRUCTURES ONTO LEUCOSAPPHIRE WAFERS

Petuhov I.B., Retsiukhin G.E.

OJSC "Planar-SO"

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Studies and selection of technological modes of laser scribing of sapphire plates with a thickness of 100 microns using a pulsed fiber nanosecond laser with a wavelength of 355 nm and an average radiation power of 3 W and a pulse repetition frequency of 300 kHz for the creation of electronics products have been carried out.

Key words: pulsed fiber laser, laser ablation of materials, scribe cut, radiation flux density, sapphire substrates (wafers).

Адрес для переписки: Петухов И.Б., ОАО «Планар-СО», пр. Партизанский, 2/6, г. Минск, 220033, Республика Беларусь

e-mail: petuchov@kbttem.by

Развитие лазерных технологий обработки материалов, используемых в полупроводниковой промышленности, таких как кремниевые пластины, карбид кремния, сапфир, ниобат лития, тонкое стекло и др., позволяет создавать уникальное оборудование для сборки миниатюрных изделий электроники. При этом используются технологии лазерного сверления, лазерной пайки, лазерного скрайбирования (резки) и формирования топологии на промежуточных подложках, так называемых, интерпозерах. Дополнительными стимулами развития оборудования лазерной обработки является появление широкой номенклатуры волоконных лазеров ультрафиолетового и инфракрасного диапазона [1; 2], повышение компактности конструкции источников излучения и упрощения в отдельных случаях оптической системы.

Процессы, протекающие при взаимодействии лазерного излучения с материалами, а, следовательно, и результат этого взаимодействия зависят от коэффициента поглощения излучения на длине волны лазерного источника, энергии и длительности лазерного импульса. Независимо от механизма поглощения излучения результирующий рост температуры в зоне воздействия приводит к разрушению материала. Эффективность разрушения материала под действием лазерного излучения зависит от плотности мощности и длительности воздействия лазерного излучения. Чем короче длина волны и меньше реальная угловая расходимость, тем лучше можно сфокусировать излучение и обеспечить минимально возможный размер

зоны воздействия. Чем короче длительность импульса излучения, тем меньшее тепловое и деформационное влияние на материал вне зоны облучения. Данный эффект определяется физическими процессами, происходящими в материале при поглощении лазерного излучения. Если импульс излучения достаточно короткий, а плотность потока излучения достаточно высока, то малый объем материала может быть расплавлен и испарен до того, как тепло из зоны облучения успеет распространиться в окружающий материал.

Особенностью обработки оптически прозрачных материалов, к которым относится лейкосапфир, является отражение лазерного излучения от поверхностей обработки, тыльной стороны и распространение к верхней поверхности с высокой вероятностью повреждения топологических структур на поверхности подложки (рисунки 1 и 2).

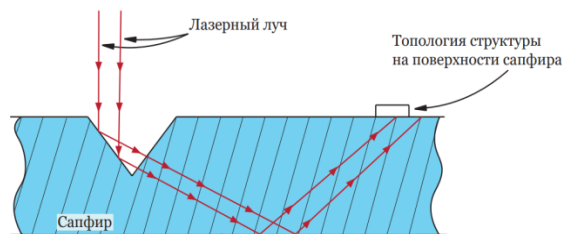


Рисунок 1 – Отражение лазерного луча в прозрачных структурах обрабатываемых материалов

Данный эффект отражения лазерного излучения связан с фокусировкой лазерного луча и когерентностью самого образуемого реза (рисунок 1).

Использование лазера с длиной волны 355 нм со средней мощностью излучения 3 Вт и длительностью импульса 1,5 нс с широким диапазоном регулировки частоты импульсов (10–300 кГц) при фокусировке в пятно малого размера (<8 мкм) позволило достигнуть необходимую плотность мощности излучения порядка $13,2 \cdot 10^9$ Вт/см², при которой происходит испарение материала.

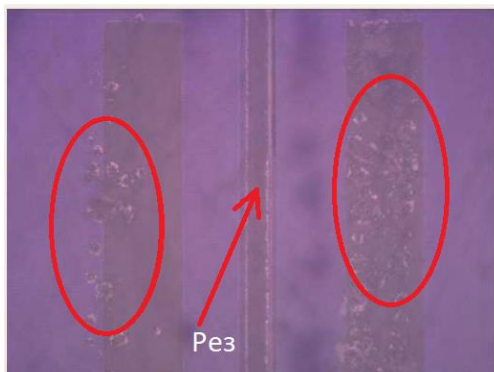


Рисунок 2 – Следы воздействия отраженного лазерного луча на поверхностные элементы топологии лицевой поверхности подложки (зоны в овальных границах)

В сочетании с программно-управляемым перемещением обрабатываемой пластины сапфира по координатам X и Y относительно луча лазера происходит обработка материала по траектории воздействия лазерного луча. Внешний вид полученного реза показан на рисунке 3.



Рисунок 3 – Вид скрайберного реза на сапфировой пластине

Экспериментальные работы проводились на установке ЭМ-4452-1 производства ОАО «Планар-СО». Для оптимизации технологического процесса использовались следующие подходы. Первый заключался в многоходовых (100, 50 и 30 проходах) лазерного луча при высокой скорости (до 200 мм/с) перемещения координатного стола с пластиной. Второй подход заключался в одном проходе лазерного луча с малой скоростью (4–7 мм/с). При этом установлено, что при формировании скрайберного реза несколькими проходами происходит воздействие отраженного от формирующейся стенки реза и нижней поверхности сапфировой подложки, не поглощенного материалом слой лицевой стороны подложки. Следы данного лазерного воздействия приведены на фотографии скрайберного реза (рисунок 2). При формировании скрайберного реза за один проход следов лазерного воздействия на поверхностный слой лицевой стороны подложки не выявлено. Исходя из данного обстоятельства, скрайберный рез рекомендуется выполнять за один проход.

Установлено также, что скорость скрайбирования должна находиться в диапазоне 5–7 мм/с. Нарушение нижнего предела скорости может привести к перегреву материала и образованию сквозных трещин за счет термораскальвания. При превышении верхнего предела скорости глубины реза может быть недостаточно для проведения качественной механической ломки кристаллов при операции разделения.

Полученные данные необходимо учитывать при обработке оптически прозрачных материалов для достижения бездефектной операции лазерного скрайбирования.

Литература

1. Ланин, В.Л. Формирование отверстий в полупроводниковых материалах лазерной микрообработкой / В.Л. Ланин, И.Б. Петухов, Г.Е. Ретюхин // Электронная обработка материалов. – 2022. – № 58 (6). – С. 73–79.
2. Вакс, Е.Д. Практика прецизионной лазерной обработки / Е.Д. Вакс, М.Н., Миленский, Л.Г. Сапрыкин. – М. : Техносфера, 2013. – 696 с.

УДК 621.372.8

РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МЕЖМОДОВОЙ ДИСПЕРСИИ В МНОГОМОДОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

Поляков А.В.¹, Ксенофонов М.А.², Каваленя А.А.¹

¹Белорусский государственный университет

²НИИУ «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. С помощью рециркуляционного метода измерений получено значение межмодовой дисперсии многомодового кварцевого градиентного волоконного световода (ВС). Достоинством метода является возможность проводить измерения, используя короткие отрезки ВС (длиной десятки и сотни метров), при этом относительная погрешность измерений не превышала 2 %. Рассчитаны такие характеристики волокна как параметр профиля показателя преломления, форма распределения показателя преломления вдоль сердцевины волокна, число распространяющихся мод.

Ключевые слова: многомодовое оптическое волокно, межмодовая дисперсия, рециркуляционный метод, характеристики градиентного волокна.

RECIRCULATION METHOD FOR MEASURING INTERMODAL DISPERSION IN MULTIMODE OPTICAL FIBERS

Polyakov A.V.¹, Ksenofontov M.A.², Kavaleny A.A.¹

¹Belarusian State University,

²A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of BSU
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Using the recirculation measurement method, the value of the intermodal dispersion of the multimode quartz gradient optical fiber (OF) was obtained. The advantage of the method is the ability to carry out measurement using a short segment of the OF (the length of tens and hundreds of meters), while the relative measurement error did not exceed 2 %. Such characteristics of fiber as a parameter of the refractive index profile, the form of the refractive index distribution along the fiber core, the number of extending mods are calculated.

Key words: multimode optical fiber, intermodal dispersion, recirculation method, characteristics of gradient fiber.

Адрес для переписки: Поляков А.В., пр. Независимости, 4, г. Минск, 220030, Республика Беларусь
e-mail: polyakov@bsu.by

Несмотря на то, что в протяженных волоконно-оптических линиях связи повсеместно используются одномодовые волокна, в локальных городских и корпоративных сетях продолжают активно применяться многомодовые волоконные световоды (ВС), что связано с их большей надежностью, механической прочностью и существенно меньшей стоимостью. Многомодовые ВС удовлетворяют требованиям поддержания стандартных систем SONET/SDH, а также транспорт Ethernet и их совместную работу в диапазоне скоростей от 10 Мбит/с до 1 Гбит/с. Межмодовая дисперсия, возникающая вследствие того, что многомодовые ВС поддерживают распространение большого количества мод, является основным фактором, ограничивающим их широкополосность. Вследствие того, что все моды распространяются в оптическом волокне по различным траекториям, огибающие модулированного светового сигнала различных мод по мере распространения сигнала по волокну все больше и больше отличаются по фазе. При использовании цифровой системы каждая мода передает информационный импульс, время распространения которого отличается от времени распространения импульса другой моды, что в результате вызывает изменение формы результирующего импульса на

выходе оптического волокна, в частности, увеличение длительности и уменьшение амплитуды переданного импульса. Межмодовая дисперсия обычно ограничивает расстояние передачи лучших многомодовых волокон до 1–2 км, обеспечивая битовую скорость до 1 Гбит/с. При эксплуатации многомодовых ВС часто стоит задача определения их дисперсионных параметров в том случае, когда отсутствуют паспортные данные. Традиционно для определения межмодовой дисперсии используют метод регистрации уширения оптического импульса. Однако данный метод неприменим при исследовании коротких волоконных световодов с длинами от десятков до нескольких сот метров.

В данной работе для определения среднеквадратического значения межмодовой дисперсии σ_m (являющейся доминирующей в многомодовых волокнах) в ВС длиной (10–500) м был использован рециркуляционный способ [1], основанный на изменении частоты рециркуляции одиночного импульса при относительном смещении торцов исследуемого и короткого (длиной 1–2 м) зондирующего ВС. Для экспериментов использовался волоконно-оптический датчик (ВОД) на основе оптоэлектронной рециркуляционной системы с периодической регенерацией амплитуды, дли-

тельности и формы импульсов на каждом цикле рециркуляции. В данной схеме частота рециркуляции однозначно определяется суммой задержек во всех элементах контура. Принцип измерения заключается в следующем. Измеряемый отрезок многомодового волокна жестко закреплен. Один конец короткого (~ 1 м) зондирующего ВС смещается в радиальном направлении относительно оптической оси с помощью микрометрического устройства, а другой конец соединен с фотоприемником. Воздушный промежуток между торцами ВС являлся селектором пространственных мод. При совпадении оптических осей ВС частота рециркуляции максимальна, поскольку на приемный блок попадают «быстрые» лучи, распространяющиеся вдоль оптической оси. В результате относительного смещения торцов волокон происходит пространственная селекция мод многомодового ВС и наблюдается уменьшение частоты рециркуляции, поскольку период циркуляции определяется уже более «медленными» модами, распространяющимися под углом к оптической оси. Поскольку диаметр сердцевины зондирующего ВС является достаточно небольшим (для одномодового ВС 9 мкм), это обеспечивает повышенную селективность мод. Регистрируя изменение частоты рециркуляции и зная длину ОВ, можно оценить величину σ_m .

Для исследуемого волокна выражение для расчета величины смещения имеет вид:

$$\Delta l = \frac{S}{\sqrt{\left(\frac{1}{NA}\right)^2 - 1}}, \quad (1)$$

где NA – числовой апертуры ОВ.

Согласно (1), при воздушном зазоре между торцами волокон $S = 150$ мкм, для того чтобы пространственные моды, выходящие из исследуемого ВС под критическим углом, попадали на оптическую ось зондирующего ВС, необходимо сместить его на 30 мкм относительно оптической оси.

На рисунке 1 представлена экспериментальная зависимость изменения частоты рециркуляции от величины смещения для многомодового кварцевого градиентного ВС длиной 52 м на длине волны 0,825 мкм. Из рисунка 1 нашли, что при совпадении оптических осей волокон средняя частота рециркуляции при времени измерения частотомера 1 с и снятии семи экспериментальных значений для каждой точки, равнялась $f_0 = 3350516$ Гц. При относительном смещении оптических осей ВС на $\Delta l = 30$ мкм частота рециркуляции уже составляла $f_1 = 3348416$ Гц, а изменение частоты рециркуляции равнялась $\Delta f \approx 2100$ Гц.

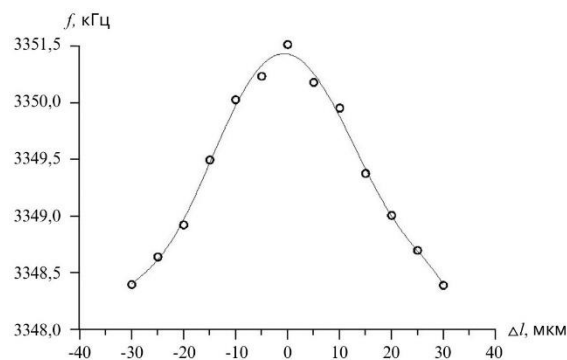


Рисунок 1 – Зависимость частоты рециркуляции волоконно-оптического датчика от величины смещения торца зондирующего ВС относительно оптической оси

Межмодовая дисперсия вычислялась по формуле:

$$\sigma_m = \frac{0,425}{L} \left(h_m \left[\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_0} \right] \right), \quad (2)$$

где длина ВС измерялась в километрах, а h_m определяла ту часть изменения частоты рециркуляции, которая обусловлена межмодовой дисперсией.

Рассчитанная по формуле (2) с использованием данных на рисунке 1 межмодовая дисперсия в нашем эксперименте составляла величину $\sigma_m = 1,190 \pm 0,012$ нс/км. Это соответствует ширине полосы многомодового ВС $357,1 \pm 3,4$ МГц · км. Экспериментально полученная величина полосы пропускания ВС хорошо совпадала с паспортным значением исследуемого волокна 350 МГц · км для данной длины волны. Относительная погрешность измерений межмодовой дисперсии не превышала 2%. Данная методика позволяет определять межмодовую временную дисперсию многомодовых ВС как с градиентным, так и со ступенчатым профилем показателя преломления.

Подставляя полученное значение σ_m и решая обратную задачу нашли, что для исследуемого волокна с $n_0 = 1,475$ и $n_1 = 1,465$ (числовая апертура $NA = 0,17$) величина α равнялась 2,12. Для полученного значения α -профиля показателя преломления рассчитаны зависимость распределения показателя преломления вдоль сердцевин градиентного многомодового ВС и количество распространяющихся мод, равное 274.

Литература

1. Поляков, А.В. Определение дисперсионных характеристик многомодовых оптических волокон рециркуляционным способом / А.В. Поляков, С.И. Чубаров // Датчики и системы. – 2002. – № 3. – С. 12–15.

УДК 681.785.57

РЕГИСТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОДНОЙ СРЕДЫ ОПТИЧЕСКИ СВЯЗАННЫМИ МИКРОРЕЗОНАТОРАМИ

Саечников А.В., Чернявская Э.А., Саечников В.А.

*Белорусский Государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе представлена методика регистрации параметров водных растворов, полученных в измерительной системе, основанной на матрице связанных оптических микрорезонаторов с управляемыми характеристиками. Матрица оптически связанных микрорезонаторов построена как упорядоченный набор полимерных микротороидов изготовленных методом трехмерной стереолитографии. Экспериментально продемонстрирована возможность идентификации изменений кислотности сред на уровне 0,01 на примере изменений интенсивности энергии перенесенной между связанными микрорезонаторами.

Ключевые слова: оптический сенсор, микрорезонатор, мода шепчущих галерей.

REGISTRATION OF AQUEOUS MEDIUM PARAMETERS BY OPTICALLY COUPLED MICRORESONATORS

Saetchnikov A.V., Tcherniavkaia E.A., Saetchnikov V.A.

*Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The paper presents a technique for registration of aqueous solution parameters obtained in a measuring system based on a matrix of coupled optical microresonators with controllable properties. The matrix of optically coupled microresonators is constructed as an ordered set of polymer microtoroids made by three-dimensional stereolithography. The possibility of identification of changes in the acidity of media at the level of 0.01 is experimentally demonstrated using the example of changes in the intensity of energy transferred between coupled microresonators.

Key words: optical sensor, microresonator, whispering gallery mode.

*Адрес для переписки: Саечников А.В., ул. Курчатова 1, г. Минск, 220045, Республика Беларусь
e-mail: asaetchnikov@bsu.by*

Измерительные системы, использующие оптический резонанс в кольцевыми микроструктурах, стали одними из наиболее чувствительных методов для регистрации различных физических и химических параметров без использования маркеров. Широкое применение данного подхода ограничено из-за существующих конфигураций для количественной оценки изменений в окружающей среде вне лабораторных условий и низкой доступности таких систем, где требуется собирать спектрально-разрешенные данные. Один из перспективных методов решения этой проблемы – использование матрицы одиночных микрорезонаторов в виде датчика, который позволяет одновременно исследовать тысячи микрорезонаторов и многократно использовать их [1–5]. Однако для количественной оценки регистрируемых изменений в данной схеме требуется привлечение методов машинного обучения [4; 5]. В данной работе представлена методика идентификации параметров водных растворов, полученных с использованием измерительной системы, основанной на матрице связанных оптически микрорезонаторов.

Для изготовления связанных микрорезонаторов используется фоторезист SZ2080, смешанный с фотоинициатором 4,4'-Bis-(diethylamino)-benzophenon и мономером DMAEMA. В этой композиции второй мономер служит как радикальный тушитель на протяжении всего процесса полимеризации для реализации двухфотонной полимеризации с диффузией. Перед нанесением фоторезиста на подложке формировался слой полимера с малым показателем показателя преломления толщиной 400 нм, который необходим для увеличения нагруженной добротности микрорезонаторов.

В рамках работы была предложена модель сенсора состоящего из двух тороидальных микрорезонаторов находящихся на расстоянии сопоставимом с длиной волны облучающего лазера. Было выявлено, что при расстоянии между тороидами менее 500 нм наблюдается оптическая связь между модами и наблюдению рассеянного излучения для мод, которые распространяются в обратном направлении внешним лазером направлении. Геометрия каждого микрорезонатора была спроектирована таким образом, чтобы потери на рассеяние не превышали потерей на поглощение, и поэтому большой радиус тороида составлял 21 мкм, а малый радиус 1,8 мкм. Шарнир, внедренное в структуру сенсора, позволяет тороиды с минимальными искажениями с использованием стандартной послойной двухфотонной полимеризации. Схема изготовления микрорезонаторов основана на двухфотонной полимеризации и реализуется с использованием фемтосекундного Ti:Sa лазера. Изготовленные микрорезонаторы характеризуются нагруженной добротностью до 10^5 в водной среде без дополнительных этапов пост-обработки.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ СВЯЗАННЫХ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ

Чувствительность отдельного микрорезонатора (величина сдвига резонансной частоты от величины изменений показателя преломления) регулировалась путем изменения условий облучения фоторезиста во время создания микрорезонатора, где уменьшение плотности потока фотонов приводило к увеличению отношения площади поверхности полимера к его объему и наоборот. Кроме того, было установлено, что обратимые изменения формы микрорезонатора, вызванные контактом с обнаруживаемыми молекулами, приводят к увеличению отклика на изменения показателя преломления в объеме более чем в 20 раз по сравнению с численными расчетами, основанными на ближнепольном отклике. В случае связанных микрорезонаторов это приводит к изменению условий переноса энергии между микрорезонаторами и изменению величины энергии, наблюдаемой в модах, распространяющихся в противоположном направлении. Таким образом к спектральному отклику микрорезонаторов на изменения в окружающей среде добавляется дополнительный параметр величины перенесенной энергии, количественная оценка которого не требует спектрально-разрешенных методов регистрации.

Для оценки эффективности метода детектирования на связанных микрорезонаторах изготавливались образцы из не менее 100 структур по два микрорезонатора. Для надежного переноса энергии в матрицу оптических микрорезонаторов мы использовали ранее разработанную методику параллельного опроса на основе оптической призмы, которая позволяет опрашивать резонаторы при фиксированной длине волны. Условия возбуждения резонанса были настроены путем оптимизации угла заведения и поляризации излучения для формирования фундаментальной моды.

Анализ производительности сенсора, основанного на связанных микрорезонаторах, исследовался на примере регистрации изменений показателя кислотности среды, где ее величина варьировалась растворами соляной кислоты и гидроксида натрия. Было показано, что направление изменения величины перенесенной энергии между резонаторами коррелирует с изменением показателя кислотности среды (при увеличении кислотности сигнал усиливается, при уменьшении становится слабее). Одиночные микрорезонаторы, которые опрашиваются и фиксированной длине волны характеризуются нелинейными флуктуациями интенсивности между устойчивыми состояниями, а динамические изменения между ними в течение

времени обладают сложной структурой. В отличие от них связанные микрорезонаторы показывают линейный отклик для перенесенной энергии в зависимости от величины изменения кислотности среды, что упрощает методику количественной оценки откликов. Из-за естественного разброса характеристик чувствительности микрорезонаторов обобщенный отклик сенсора просчитывался как первая главная компонента, которая представляет собой линейную комбинацию изменений перенесенной энергии для всех связанных структур и отражает наиболее наибольшую дисперсию во всем наборе данных. Такое представление спектральных изменений имеет преимущества для учета различной чувствительности микрорезонаторов и снижения влияния локальных изменений/шумов, которые классифицируются как незначительные компоненты с помощью анализа главных компонент (PCA). Для связанных микрорезонаторов была определена возможность детектирования изменений кислотности на уровне 0,01 (предел чувствительности электрохимического сенсора кислотности).

Представленные результаты демонстрируют возможность идентификации физических и химических параметров водных сред на основе оптически связанных микрорезонаторов. На примере матрицы связанных полимерных микрорезонаторов продемонстрирована возможность детектирования изменений кислотности среды по значению интенсивности перенесенной энергии мод на уровне 0,01.

Литература

1. Reusable Dispersed Resonators-Based Biochemical Sensor for Parallel Probing / A.V. Saetchnikov [et al.] // *IEEE Sensors Journal*. – 2019. – Vol. 19, № 17. – P. 7644–7651.
2. A Laser Written 4D Optical Microcavity for Advanced Biochemical Sensing in Aqueous Environment / A.V. Saetchnikov [et al.] // *Journal of Lightwave Technology*. – 2020. – Vol. 38, № 8. – P. 2530–2538.
3. Multiresonator Imaging Sensor for the Aerial Parameters Detection / A.V. Saetchnikov [et al.] // *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*. – 2021. – Vol. 2, № 2. – P. 84–91.
4. Deep-learning powered whispering gallery mode sensor based on multiplexed imaging at fixed frequency / A.V. Saetchnikov [et al.] // *Opto-Electronic Advances*. – 2020. – Vol. 3. – P. 200048.
5. Intelligent optical microresonator imaging sensor for early stage classification of dynamical variations / A.V. Saetchnikov [et al.] // *Advanced Photonics Research*. – 2021. – Vol. 7. – P. 2100242.

УДК 666.3

ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ КЕРАМИКИ СОСТАВА YAG:Yb, Er НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Вакалов Д.С., Чикулина И.С., Кичук С.Н.

Северо-Кавказский федеральный университет
Ставрополь, Российская федерация

Аннотация. В данной работе было исследовано влияние микроструктуры керамики состава YAG:1 ат. % Er, 5 ат. % Yb на ее теплопроводность. Показано, что для керамики состава YAG:1 ат. % Er, 5 ат. % Yb при увеличении коэффициента оптического пропускания увеличивается коэффициент теплопроводности.

Ключевые слова: оптическая керамика, YAG, теплопроводность, коэффициент светопропускания.

THE EFFECT OF THE MICROSTRUCTURE ON THERMAL CONDUCTIVITY OF YAG:Yb, Er CERAMICS

Vakalov D.S., Chikulina I.S., Kichuk S.N.

North Caucasus Federal University
Stavropol, Russian Federation

Abstract. In this work, the influence of the microstructure of YAG:1 at. % Er, 5 at. % Yb ceramics on thermal conductivity was studied. It is shown that for ceramics of the YAG:1 at. % Er, 5 at. % Yb composition, with an increase in the optical transmission coefficient, the thermal conductivity increases.

Key words: optical ceramics, YAG, thermal conductivity, light transmission coefficient.

Адрес для переписки: Чикулина И.С. пр. Кулакова, 2, г. Ставрополь, 355029, Российская Федерация
e-mail: dvakalov@ncfu.ru, ichikulina@ncfu.ru, skichuk@ncfu.ru

Введение. Легированный редкоземельными элементами иттриево-алюминиевый гранат (YAG) используется в различных оптических устройствах, включая твердотельные лазеры, а также в качестве люминофора в твердотельных осветительных приборах и сцинтилляторах благодаря своим превосходным механическим, тепловым и оптическим свойствам [1; 2].

Одним из основных препятствий при разработке лазерных систем высокой и средней мощности является проблема перегрева, которая негативно влияет на производительность лазера.

При проведении процесса интенсивной и высокоэнергетической оптической накачки в твердотельном лазерном материале наблюдается выделение большого количества тепла и, следовательно, это приводит к появлению значительного температурного градиента в материале. Все эти явления в конечном счете приводят к тепловым аберрациям и разрушению при термическом напряжении.

Таким образом, выходная мощность твердотельных лазеров в основном ограничена тепловыми эффектами в среде усиления.

Для решения проблем термического напряжения, связанных с использованием высокой выходной мощности, требуемой при высокой производительности, важно проводить комплексный термический анализ при проектировании средне и высокоэнергетических лазерных систем.

Теплопроводность K ($Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1}$), тепловое расширение α ($1/К$) и термооптический коэффициент dn/dT ($1/К$) являются особенно важными параметрами для тепловой оценки лазерной среды [3].

Цель работы. Проведение данного исследования позволит установить связь между микроструктурой оптической керамики состава YAG:Yb, Er и ее теплофизическими свойствами, что может быть полезным для разработки новых материалов с улучшенными оптическими и теплофизическими характеристиками.

Методы исследования. В работе были исследованы образцы оптической керамики на основе алюмоиттриевого граната, активированные ионы иттербия и эрбия в концентрации 5 ат. % и 1 ат. % соответственно.

Для получения экспериментальных образцов использовали керамические порошки, предварительно синтезированные с использованием метода химического соосаждения. В качестве спекающих добавок использовали TEOS и MgO (таблица 1). Вакуумное спекание экспериментальных образцов А1, А2, А3, А4, А5 проводили при оптимальной температуре для каждой комбинации концентраций спекающих добавок, со скоростью нагрева 5 °C /мин и временем выдержки 10 ч.

Таблица 1. Концентрации спекающей добавки

Образец	A1	A2	A3	A4	A5
MgO, масс. %	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
TEOS, масс. %	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
$T_{\text{вакуум. спек.}}$, °C	1750	1775	1800	1825	1850

Измерение коэффициента теплопроводности проводили измерителем теплофизических характеристик LFA 467 HyperFlash (Netzsch). Коэффициент светопропускания измеряли спектрофотометром СФ-56 (ОКБ «Спектр») в диапазоне длин

волн от 200 до 1100 нм. Микрофотографии структуры оптической керамики получали, используя сканирующий электронный микроскоп *FESEM LMP Mira 3 (Tescan)*. Фазовый состав оценивали методом рентгеновской дифрактометрии с помощью дифрактометра *ARL X'TRA (Thermo Fisher Scientific)* с $\text{Cu-K}\alpha$ 1,5406 Å.

Экспериментальная часть. Анализ фазового состава образцов А1-А2-А3-А4-А5 показал, что в керамике присутствовала только фаза граната, без каких-либо примесных фаз. При исследовании поверхности керамических образцов (рисунок 1) было выявлено, что образцы А1 и А2 содержат закрытые поры размером 1–2 мкм. Характерной особенностью образца А3 является отсутствие примесных включений, а также открытых и закрытых пор. Образец А4 содержит поры, расположенные в межзерненном пространстве, размером от 5 до 10 мкм. В керамическом образце А5 кроме закрытых пор видно присутствие в межзерненном пространстве примесной фазы.

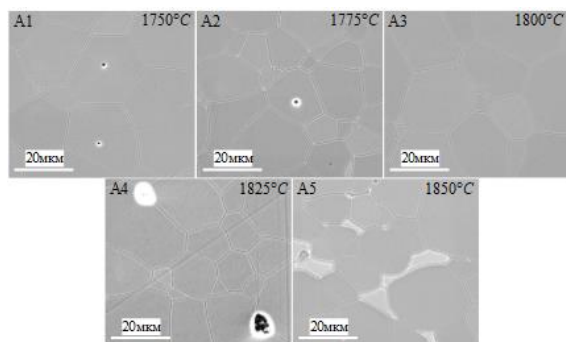


Рисунок 1 – СЭМ-изображения поверхности керамики состава $\text{YAG:1 ат.}\% \text{Er, 5 ат.}\% \text{Yb}$

Для каждого образца были получены спектры светопропускания. Коэффициент оптического пропускания на длине волны 1100 нм для образцов составил: А1 – 80,9 %, А2 – 80,1 %, А3 – 82,1 %, А4 – 79,1 % и А5 – 75,6 %. Таким образом, присутствие дефектов в микроструктуре керамических образцов, таких как открытые и закрытые поры, а также примесные включения приводит к снижению коэффициента светопропускания керамики, что, по-видимому, связано с увеличением светорассеяния. Из анализа литературных данных известно [4–6], что величина коэффициента светопропускания является основным показателем ее качества, определяющим совершенство микроструктуры, что в свою очередь оказывает значительное влияние на другие параметры, такие, например, как теплопроводность.

Для определения связи между микроструктурой оптической керамики состава YAG:Yb, Er и ее теплофизическими свойствами была получена зависимость коэффициента теплопроводности от коэффициента светопропускания, представленная на рисунке 2.

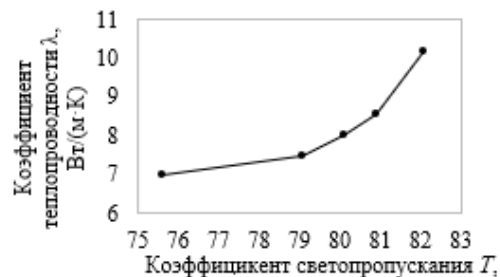


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента теплопроводности от светопропускания керамики состава $\text{YAG:1 ат.}\% \text{Er, 5 ат.}\% \text{Yb}$

Полученная зависимость свидетельствует о том, что образцы с наибольшим коэффициентом светопропускания обладают наилучшей теплопроводностью. Таким образом, увеличение доли различных дефектов в микроструктуре керамики приводит как к уменьшению величины светопропускания, так и к снижению теплопроводности. **Выводы.** В результате проведенной работы были получены образцы оптической керамики состава $\text{YAG:1 ат.}\% \text{Er, 5 ат.}\% \text{Yb}$. Проведены исследования оптических и теплофизических характеристик полученных образцов и изучена их микроструктура. Показано, что при уменьшении коэффициента пропускания с 82,1 до 75,6 % величина коэффициента теплопроводности снижается с 10,18 до 6,98 Вт/(м·К). Таким образом, наличие дефектов в структуре керамики оказывает негативное влияние на величину светопропускания и существенно снижает ее теплопроводность.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-23-00084 (<https://rscf.ru/project/23-23-00084/>), используя научное оборудование центра коллективного пользования СКФУ.

Литература

1. Ikeseue, A. Ceramic laser materials / A. Ikeseue, Y.L. Aung // *Nat. Photonics*. – 2008. – Vol. 2, № 12. – P. 721–727.
2. Taira, T. RE3+-ion-doped YAG Ceramic Lasers / T. Taira // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* – 2007. – Vol. 13, № 3. – P. 798–809.
3. *Solid-State Laser Engineering*. NY: Springer New York, 2006. – Vol. 1.
4. Bakunov, V.S. Special characteristics of the technology of high-density technical ceramics. Chemical methods for obtaining the initial powders / V.S. Bakunov, E.S. Lukin // *Glas. Ceram.* – 2008. – Vol. 65, № 1–2. – P. 33–37.
5. Лукин, Е.С. Современная высокоплотная оксидная керамика с регулируемой микроструктурой. Часть I. Влияние агрегации порошков оксидов на спекание и микроструктуру керамики / Е.С. Лукин // *Огнеупоры и техническая керамика*. – 1996. – № 1. – P. 5–14.
6. Effect of Microstructure on Transmission Properties of Polycrystalline Transparent Ceramics / Li Q. [et al.] // *Mater. Sci. Forum.* – 2011. – Vol. 704–705. – P. 842–846.

УДК 681.7.023.72

ГРУППОВОЙ МЕТОД ФОРМООБРАЗОВАНИЯ КОНИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТЕКЛА ПЛОСКИМ ИНСТРУМЕНТОМ

Филонова М.И., Козерук А.С., Попкович А.И., Якубович А.Д., Диас Гонсалес Р.О.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрена схема обработки конических поверхностей посредством их притирания к плоскому инструменту и предложено техническое решение для реализации такой обработки. Использование созданного авторами устройства позволяет реализовать групповой метод формообразования конических деталей с отклонением образующей конуса от прямолинейности не более 0,00012 мм. Разработана математическая модель, устанавливающая закономерности съема припуска с конической детали плоским инструментом. Предложена методика оптимизации наладочных параметров технологического оборудования.

Ключевые слова: коническая поверхность, плоский инструмент, свободное притирание, параметры обработки.

GROUP METHOD OF FORMING CONICAL GLASS PARTS USING A FLAT TOOL

Filonova M.I., Kozeruk A.S., Popkovich A.I., Yakubovich A.D., Dias Gonsales R.O.

Belarusian national technical university
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The scheme of processing conical surfaces by grinding them to a flat tool is considered and a technical solution for the implementation of such processing is proposed. Using the created device allows implementing the group method of forming conical parts with a deviation of the generatrix of the cone from straightness of not more than ± 0.00012 mm. A mathematical model of the patterns of removal of stock from a conical part with a flat tool is developed. The proposed optimization technique for the adjustment parameters of technological equipment.

Key words: conical part, flat tool, free grinding, processing parameters.

Адрес для переписки: Филонова М.И., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: filonovami@bntu.by

В оптико-электронных приборах, предназначенных для измерения дальности до объекта импульсным методом, эффективным является обеспечение максимальной добротности импульсов лазерного излучения [1]. В оптической схеме дальномера применяют конические линзы – аксиконы. В настоящее время в странах ближнего и дальнего зарубежья обработка такой оптической детали осуществляется малопроизводительными методами, или методами, не обеспечивающими высокую точку обработки.

Поэтому разработка технологии групповой обработки аксиконов (оптических конических деталей) с применением инженерных методов управления процессом формообразования их поверхностей плоским инструментом является актуальной научно-технической проблемой.

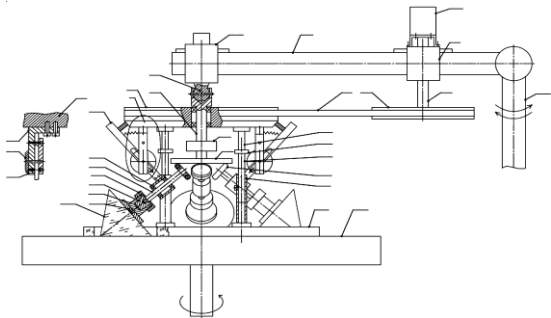


Рисунок 1 – Схема устройства для обработки образующей конических линз

Устройство для обработки конической поверхности (рисунок 1) [2] содержит соединенные между собой клиноременной передачей 1 ведущий 2 и ведомый 3 шкивы. Первый из них вращается вместе с ведущим шкивом 4 в дополнительной зажимной колодке 5, а второй установлен с возможностью вращения вокруг оси вала ведомого шкива 6, неподвижно соединенного через компенсационную муфту 7 с планшайбой с хвостовиком 8 и шарнирно – с поводком 9, который, в свою очередь, неподвижно закреплен в основной зажимной колодке 10. Основная 10 и дополнительная 5 зажимные колодки установлены подвижно на выходном звене исполнительного механизма станка 11, находящегося в шарнирном соединении с его приводным валом 12. На дополнительной колодке 5 смонтирован электродвигатель 13, соединенный с валом ведомого шкива 4. На ведомом шкиве 3 закреплены неподвижные кронштейны 14 с лимбами 15 и верхние части гибких стоек 16, соединенных с помощью компенсационных муфт 17 с нижней частью гибких стоек 18, находящихся в подвижном соединении с полыми стойками 19, жестко соединенными с установленной на инструмент 20 правильной пластиной 21, снабженной отверстиями для обрабатываемых деталей 22. Подвижные кронштейны 23 с указателями 24 установлены с возможностью вращения вокруг осей лимбов относительно неподвижных двух кронштейнов 14. С нижним

концом подвижных кронштейнов 23 жестко связаны узлы крепления обрабатываемых деталей в виде втулок 25, в которых с возможностью вращения установлены оси 26. На одном конце осей 26 закреплены фрикционные колеса 27, находящиеся в кинематической связи с планшайбой с хвостовиком 8, а второй конец осей 26 соединен с конусами 28, помещенными в конусные отверстия цанг 29, соединенных с контактными плоскопараллельными стеклянными пластинками 30, несущими конические детали 22. Сопряжение конусов 28 с цангами 29 зафиксировано гайками 31. Для компенсации колебаний инструмента 20 в горизонтальной плоскости, обусловленных биением шпинделя станка, служат компенсационные муфты 7 и 17.

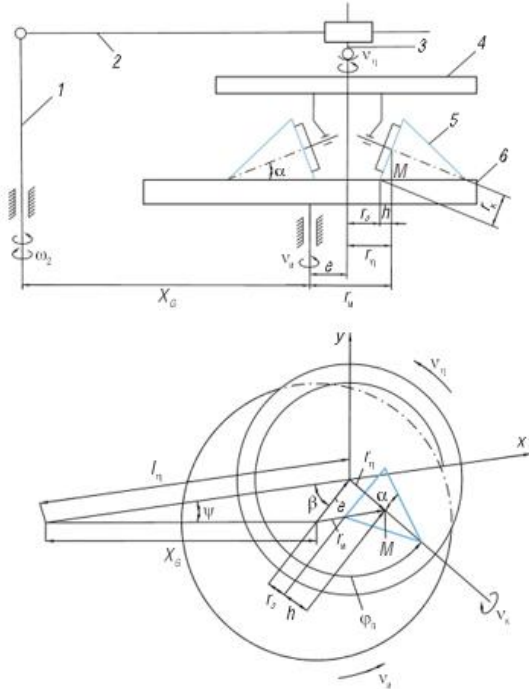


Рисунок 2 – Схема обработки деталей с коническими поверхностями (а) и векторная схема для ее расчета (б)

Для осуществления математического моделирования закономерностей обработки предлагается обработка оптических деталей с коническими поверхностями в условиях их свободного притирания к инструменту в виде планшайбы [2]. Схема такой обработки приведена на рисунке 2, а. Здесь возвратно-вращательное движение стойки 1 базового шлифовально-полировального станка модели ЗШП-350 через выходное звено исполнительного механизма (рычаг) 2 и поводок 3 преобразуется в колебательное движение планшайбы 4 вместе с коническими деталями 5 относительно инструмента 6, а вращение последнего сообщает, благодаря наличию сил трения, относительное вращение деталям, которые в результате совершают сложное движение по рабочей поверхности инструмента.

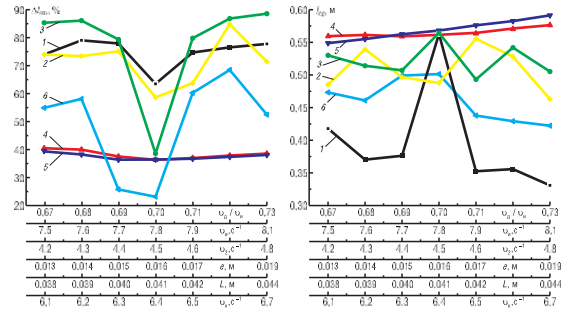


Рисунок 3 – Закономерности изменения относительного расхождения $\Delta l_{отн}$ (а) и среднего арифметического значения l_{cp} (б) путей трения при обработке боковой поверхности конической линзы в зависимости от величины: $v_{пл}/v_n$ при $v_n = 5,0 c^{-1}$, $v_2 = 4,0 c^{-1}$, $e = 0,01 м$, $L = 0,04 м$, $v_k = 3,0 c^{-1}$ (кривая 1); v_n при $v_{пл}/v_n = 0,7$ и прежних v_2, e, L, v_k (кривая 2); v_2 при $v_{пл}/v_n = 0,7$, $v_n = 7,8 c^{-1}$ и прежних e, L, v_k (кривая 3); e при $v_{пл}/v_n = 0,7$, $v_n = 7,8 c^{-1}$, $v_2 = 4,5 c^{-1}$ и прежних L, v_k (кривая 4); L при $v_{пл}/v_n = 0,7$, $v_n = 7,8 c^{-1}$, $v_2 = 4,5 c^{-1}$, $e = 0,016 м$ и прежней v_k (кривая 5); v_k при $v_{пл}/v_n = 0,7$, $v_n = 7,8 c^{-1}$, $v_2 = 4,5 c^{-1}$, $e = 0,016 м$, $L = 0,041 м$

Используя модель, изложенную в [3], можно определить скорость скольжения в любой точке обрабатываемой конической поверхности. Были проведены технические исследования закономерностей формообразования конической линзы высотой 25 мм и диаметром основания 12,5 мм. В качестве регулируемых параметров процесса обработки принимали частоты вращения инструмента, конуса и входного звена исполнительного механизма станка, отношение частот вращения правяльника и инструмента, а также амплитуду возвратно-вращательного движения первого из них по рабочей поверхности второго и их относительное смещение. Рассчитывали относительное расхождение путей трения, характеризующее качество обработки, и среднее арифметическое значение этих путей, пропорциональное производительности съема припуска с заготовки. Данные показатели определялись как при изменении каждого из отмеченных параметров в отдельности, так и при попарном их изменении в 15 различных комбинациях.

Были определены наиболее выгодные регулируемые параметры технического оборудования.

Результаты определения рациональных регулируемых параметров процесса обработки конических деталей на рассматриваемом устройстве по изложенной методике приведены на рисунке 3, а, а на рисунке 3, б показаны полученные при этом закономерности изменений средних арифметических значений путей трения. Из анализа этих результатов следует, что изменения эксцентриситета e между осями вращения инструмента и планшайбы (кривая 4 на рисунке 3, а), а также амплитуды возвратно-вращательных движений последней (кривая 5) практически не влияют как на

точность, так и на производительность обработки. Поэтому на практике можно принимать средние значения этих параметров.

Проведенные исследования производительности и качества обработки конических поверхностей при попарном изменении принятых в нашем случае регулируемых параметров показали, что из возможных различных их комбинаций наиболее выгодно назначать сочетание «частота вращения конуса – эксцентриситет между осями симметрии инструмента и планшайбы».

Литература

1. Карасик, В.Е. Лазерные системы видения / В.Е. Карасик, В.М. Орлов. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 352 с.
2. Устройство для обработки деталей с коническими поверхностями: патент РБ 17104 / А.С. Козерук [и др.].
3. Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фіз.-тэхн. навук. – 2021. – Т. 66, № 4. – С. 441–450.
4. Устройство для групповой обработки деталей с коническими поверхностями: патент РБ 21163 / А.С. Козерук [и др.].

УДК 535.6:681.628.94:681.7.069.2

СВЕТОДИОДНЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ИМИТАТОРА ДНЕВНОГО СВЕТА D50

Цвирко В.И., Острецов Е.Ф., Лишик С.И.

*Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Проведено моделирование спектра излучения светодиодного модуля для имитатора дневного света D50 на основе коммерческих светодиодов и люминофорных композиций, наносимых на светодиоды. Результирующий спектр имитатора дневного света был сформирован с использованием экспериментальных спектральных распределений излучения семи источников света, изготовленных на основе коммерческих ультрафиолетовых, синих, белых светодиодов и люминофорных композиций с зеленым и красным люминофорами. Проведена оценка соответствия ряда характеристик разработанного имитатора дневного света D50 требованиям стандарта ISO 3664:2009.

Ключевые слова: светодиод, стандартный источник света, индекс цветопередачи, индекс метамеризма.

LED MODULE FOR DAYLIGHT SIMULATOR D50

Tsvirka V., Ostretsov E., Lishik S.

*SE "Center of LED and Optoelectronic Technologies of National Academy of Sciences of Belarus"
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The emission spectrum of an LED module was simulated for a D50 daylight simulator based on commercial LEDs and phosphor compositions applied to the LEDs. The resulting spectrum of the daylight simulator was formed using experimental spectral radiation distributions of seven light sources made on the basis of commercial ultraviolet, blue, white LEDs and phosphor compositions with green and red phosphors. The compliance of a number of characteristics of the developed D50 daylight simulator with the requirements of the ISO 3664:2009 standard was assessed.

Key words: LED, standard light source, colour rendering index, metamerism index.

*Адрес для переписки: Цвирко В.И., Логойский тракт, 20, г. Минск, 220090, Республика Беларусь
e-mail: vitalii.tsvirko@gmail.com, rnd@ledcenter.by*

Имитаторы дневного света (ИДС) D50 используются в полиграфической промышленности для визуальной оценки цвета. Ранее для создания ИДС использовали гибридный подход (комбинация монохромных светодиодов, галогенных ламп и интерференционных фильтров) [1] или комбинацию коммерческих монохромных и белых светодиодов [2].

Ранее нами был предложен и успешно опробован способ создания светодиодного ИДС типа D65 на основе коммерческих светодиодов и люминофорных композиций [3]. Созданный светодиодный модуль (СМ) для ИДС D65 наиболее близко воспроизводит спектральную характеристику ИДС D65 в диапазоне длин волн от 400 нм до 660 нм, благодаря чему практически все требования к спектральным характеристикам ИДС

D65, изложенные в публикации МКО № 51.2, были выполнены, за исключением индекса метамеризма ультрафиолетового диапазона, который составил 4,5. Это не позволяет использовать разработанный ранее ИДС D65 для работы с флуоресцирующими материалами.

Современные требования к спектральному распределению энергии ИДС D50 изложены в стандарте ISO 3664:2009 (Условия просмотра. Полиграфия и фотография), который на территории стран СНГ введен в действие только на территории Республики Казахстан под наименованием СТ РК ISO 3664-2017. В качестве эталонного источника света для полиграфии принято спектральное распределение энергии стандартного источника света МКО D50 (согласно публикации МКО № 15), которое представляет собой

одну из фаз естественного дневного света с коррелированной цветовой температурой около 5000 К.

Согласно ISO 3664:2009 ИДС должен удовлетворять требованиям по следующим характеристикам: координаты цветности (отклонение не более 0,005 от точки (0,21015; 0,48886)), общий ($R_a > 90$) и частные индексы цветопередачи ($R1-R8$, более 80), индекс метамеризма видимого диапазона и индекс метамеризма ультрафиолетового диапазона. Требования к значениям индексов метамеризма ИДС ранжированы согласно ISO/CIE 23603:2005 по категорийной шкале с диапазоном от класса «А» (лучший) до класса «Е» (худший). Согласно ISO 3664:2009 по индексу метамеризма видимого диапазона допустимо применение ИДС класса С или лучше, но рекомендуется класс В или лучше, а по индексу метамеризма ультрафиолетового диапазона допускается ИДС со значением ниже 1,5 (по системе CIELAB), но рекомендуется значение менее 1,0, что соответствует классу С или лучше. Таким образом рекомендуется к использованию класс ВС или лучше.

В настоящей работе мы выполнили моделирование спектра излучения светодиодного модуля для ИДС D50 с учетом индексов метамеризма, рассчитанных в цветовой системе CIELAB. В качестве спектральных компонент для ИДС мы использовали коммерческие светодиоды и люминофорные композиции, наносимые на светодиоды. Применение люминофорных композиций позволяет более аккуратно проводить корректировку спектра излучения комбинации светодиодов с различными спектральными распределениями излучения.

Для моделирования спектров ИДС D50 были использованы теоретические и экспериментальные спектральные распределения излучения около 20 образцов источников света на основе коммерческих ультрафиолетовых, синих, белых светодиодов и люминофорных композиций с зеленым и красным люминофорами. На рисунке 1 приведен результирующий спектр ИДС D50, который удалось сформировать на основе семи типов светодиодных источников света.

Расчетные характеристики модели ИДС следующие: коррелированная цветная температура – 5050 К; координаты цветности $u'_{10} - 0,2113$, $v'_{10} - 0,4886$; общий индекс цветопередачи $R_a - 98,1$; частные индексы цветопередачи: $R1 - 97,4$; $R2 - 98,5$; $R3 - 98,5$; $R4 - 97,2$; $R5 - 97,7$; $R6 - 97,3$; $R7 - 99,2$; $R8 - 99,2$, индекс метамеризма видимого диапазона – 0,40, индекс метамеризма ультрафиолетового диапазона – 0,30.

На рисунке 2 приведены значения 14-ти частных индексов цветопередачи модели ИДС для демонстрации высоких значений индексов цветопередачи насыщенных цветов ($R9-R14$).

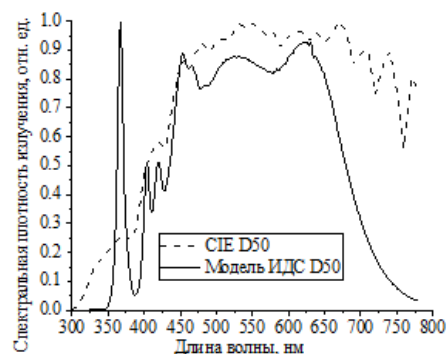


Рисунок 1 – Спектральные распределения излучения расчетной модели светодиодного модуля для ИДС D50 и стандартного источника света МКО D50

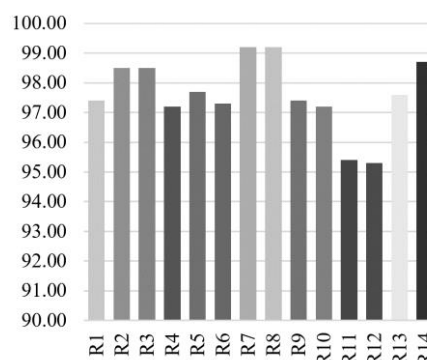


Рисунок 2 – Частные индексы цветопередачи модели светодиодного модуля для ИДС D50

Полученные значения характеристик модели ИДС соответствуют классу ВВ, что полностью удовлетворяет требованиям ISO 3664:2009, предъявляемым к спектральному распределению излучения ИДС типа D50.

Таким образом возможно создание ИДС типа D50 для полиграфической промышленности на основе коммерческих светодиодов по разработанной нами технологии спектральной модификации светодиодов. Использование люминофорных композиций позволяет более аккуратно проводить корректировку спектра излучения.

Литература

1. Гибридный лабораторный источник света для полиграфии, спектрально близкий к стандартным излучателям «D» / С.Ю. Арапов [и др.] // Светотехника. – 2016. – № 2. – С. 24–28.
2. Мезенцева, С.Г. Автономный мобильный источник света для визуального цветового контроля / С.Г. Мезенцева, А.Н. Тюменев, С.Ю. Арапов // Южно-Сибирский научный вестник. – 2020. – № 4 (32). – С. 3–7.
3. Светодиодные модули для стандартных источников света серии «D» / В.И. Цвирко [и др.] // «Приборостроение – 2022»: материал. 15-й Междунар. научн.-техн. конф., Минск, Беларусь, 16–18 ноября 2022 г. – Минск, 2022. – С. 415–417.

УДК 632.936.2

АВТОНОМНАЯ СВЕТОДИОДНАЯ ЛОВУШКА НАСЕКОМЫХ ВРЕДИТЕЛЕЙ С ПИТАНИЕМ ОТ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Челяпин А.Е., Трофимов Ю.В., Захарова Н.А., Асиненко Д.А.

*Республиканское научно-производственное унитарное предприятие
«Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий
Национальной академии наук Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты разработки светодиодной ловушки насекомых с питанием как от солнечных элементов, так и от проводной сети питания. Эффективность разработанных ловушек подтверждена проведенными экспериментами в теплицах Центрального ботанического сада НАН Беларуси.

Ключевые слова: светодиоды, аттрактант, методы борьбы с вредителями.

AUTONOMOUS LED SOLAR POWERED INSECT PEST TRAP

Chelyapin A.E., Trofimov Y.V., Zakharova N.A., Asinenko D.A.

*Republican Research and Production Unitary Enterprise
"Center for LED and Optoelectronic Technologies
National Academy of Sciences of Belarus"
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. This paper presents the results of the development of an LED insect trap powered by solar cells. The effectiveness of the developed traps was confirmed by experiments in the greenhouses of the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus.

Key words: LEDs, attractant, pest control methods.

*Адрес для переписки: Челяпин А.Е., Логойский тракт 20, г. Минск, 220090, Республика Беларусь
e-mail: rnd@ledcenter.by*

Тема ловушек насекомых-вредителей сельскохозяйственных и тепличных культур актуальна круглогодично в теплицах, «ситифермах» и в теплое время года в полевых условиях. Существуют различные методы борьбы с насекомыми-вредителями. Широко применяемый традиционно химический метод осложняется тем, что многие насекомые прекрасно приспосабливаются к химическим препаратам.

В парниках и теплицах, где пространство все же ограничено, отлично срабатывают яркие (особенно желтые) клеевые ловушки. Они позволяют определять начальные сроки вылета насекомых и отлавливать их. В отличие от феромонных, основным преимуществом светоловушек является комплексное привлечение насекомых. Еще одно преимущество световых ловушек состоит в том, что они привлекают как самок, так и самцов, тем самым непосредственно снижая численность популяции насекомого вредителя. Борьба с белокрылкой осложняется тем, что это насекомое тоже из поколения в поколение прекрасно приспосабливается к химическим препаратам. Поскольку взрослые насекомые-вредители реагируют на определенные длины волн, в некоторых исследованиях было предложено использовать такое поведение в качестве потенциальной цели для новых инструментов мониторинга и борьбы с ними [1]. Использование светоизлучающих диодов может стать важным дополнительным инструмен-

том для повышения привлекательности и избирательности этих липких лент. Для борьбы с тепличными насекомыми-вредителями нами разработаны светодиодные ловушки, принцип действия которых основан на эффекте положительного фототаксиса насекомых к источнику света с оптимальным для привлечения белокрылки спектром и интенсивностью излучением. Насекомые, приближающиеся к источнику света по характерной спиралевидной схеме полета, вращаются вокруг источника света, часто меняя свою угловую скорость и направление, садятся на источник света или под ним, таким образом прилипая к липкой ленте, входящей в состав ловушки (рисунок 1).



Рисунок 1 – Светодиодная ловушка

Светодиодные ловушки насекомых имеют различные длины волн излучения, в том числе бело-желтый цвет для более эффективного прилипания в темное время суток.

В конструкции ловушки имеется отражающий козырек, предназначенный для дополнительной подсветки липкой части ловушки в темное время суток.

Модификацией стационарной ловушки является автономная светодиодная смарт-ловушка с питанием от солнечной батареи, имеющая три различных спектра свечения, в том числе в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне. Управление и задание периода свечения ловушки осуществляются беспроводным способом по радиоканалу.

Технические характеристики ловушек представлены в таблице 1, фотографии на рисунке 2.

Таблица 1. Характеристики ловушек

Наименование параметра	Значение параметра для:	
	стационарной ловушки	автономной ловушки
Пиковое излучение	455, 540, 600 нм	365, 520, 620 нм
Потребляемая мощность	5–7 Вт	3 Вт
Напряжение питания	до 35 В	4 В
Световой поток	300–900 лм	200–500 лм
Размеры, мм	130×50×90	200×200×150

Ловушки размещаются на высоте около 20 см над растениями, однако могут подвешиваться в среднем ярусе или даже в нижнем.



Рисунок 2 – Фотографии светодиодных ловушек автономной (а) и стационарной (б)

Автономная ловушка за счет ультрафиолетового излучения может привлекать широкий спектр различных насекомых и, может быть, установлена не только в теплице, но и в открытом пространстве. Ночью заряд батареи тратится на светоизлучение, а днем источник питания заряжается за счет солнечной энергии.

На рисунке 3 представлена функциональная схема автономной ловушки.

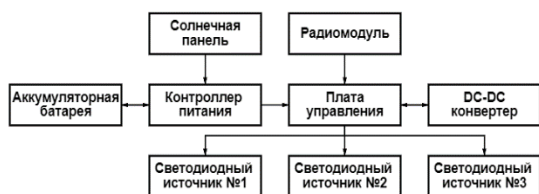


Рисунок 3 – Функциональная схема автономной ловушки

Работа ловушки происходит под управлением микроконтроллера, который принимает и декодирует радиосигнал от базовой станции и направляет питание через опциональный DC-DC конвертер на один из нескольких каналов подсветки с возможностью управления яркостью путем высокочастотной широтно-импульсной модуляции. Питание каждой ловушки обеспечивается батареей литий-ионных аккумуляторов, подзаряжаемых как от внешнего источника постоянного тока, так и благодаря солнечной панели. Параметры работы, в том числе: время включения, изменение спектра свечения передаются базовой станцией и задаются пользователем через персональный компьютер по нескольким возможным интерфейсам.

Экспериментальное опробование стационарных светодиодных ловушек проведено в теплицах Центрального ботанического сада НАН Беларуси в дневное (с 9 до 21 ч) и в ночное (с 21 до 9 ч) время [2]. Количество насекомых на липкой ленте за дневное/ночное время при естественном и светодиодном освещении приведено в сравнительной таблице 2.

Таблица 2. Сравнение эффективности ловушки в дневное и ночное время

Цвет освещения	Количество насекомых на липкой ленте за дневное/ночное время			
	Белокрылки	другие насекомые	общее количество насекомых	Количество насекомых в см ²
Естественное	325/224	32/45	357/269	0,2/0,1
Естественное + зеленый светодиодный	634/428	74/86	708/514	0,4/0,2
Естественное + оранжевый светодиодный	872/617	63/147	935/764	0,5/0,4

Таким образом, привлечение светодиодным освещением насекомых вредителей является эффективным способом их уничтожения. Наибольшее количество насекомых привлечено к липкой ленте с помощью оранжевого цвета при светодиодном освещении: в дневное время в 2,5 раза больше, чем при естественном, в ночное время в 4 раза больше, чем при естественном; в ночное время возросло в 2, 3 раза количество других насекомых, привлеченных оранжевым светом.

Литература

- Castresana, J. Efficacy of different light-emitting diodes (LEDs) attached to yellow sticky cards to capture the whitefly *Trialeurodes vaporariorum* / J. Castresana, L. Puhl // Rev. Cienc. – 2015. – Agr. 32 (2). – P. 88–93.
- Светодиодные ловушки для борьбы с белокрылкой / С.И. Лишик [и др.] // Сборник тезисов II междунар. науч.-технич. конференции ОПТО-, МИКРО- И СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА–2022, 21–23 сентября 2022 года, г. Минск, Беларусь. – Минск, 2022. – С. 34.

УДК 628.9.037

ОСВЕТИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО НА ОСНОВЕ ЛЮМИНОФОРНЫХ СВЕТОДИОДОВ ДЛЯ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ И ПРОИЗВОДСТВ

Челяпин А.Е., Острцов Е.Ф., Лишик С.И.

Республиканское научно-производственное унитарное предприятие
«Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий
Национальной академии наук Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты разработки светодиодного светильника с применением люминофорных светодиодов для освещения помещений с определенными требованиями к спектральному составу излучения светильников.

Ключевые слова: светодиоды, специализированное освещение, модифицированный спектр излучения.

LIGHTING DEVICE BASED ON PHOSPHOR LEDS FOR LIGHT-SENSITIVE LABORATORIES AND PRODUCTION

Chelyapin A.E., Ostretsov E.F., Lishik S.I.

Republican Research and Production Unitary Enterprise
"Center for LED and Optoelectronic Technologies
National Academy of Sciences of Belarus"
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. This paper presents the results of the development of an LED lamp using phosphor LEDs for lighting rooms with certain requirements for the spectral composition of the lamps' radiation.

Key words: LEDs, specialized lighting, modified emission spectrum.

Адрес для переписки: Челяпин А.Е., Логойский тракт, 20, г. Минск, 220090, Республика Беларусь
e-mail: rnd@ledcenter.by

Желтый свет узкого спектра необходим в помещениях, где используются или производятся фотохимически чувствительные материалы, чтобы предотвратить непреднамеренное воздействие ультрафиолетового и синего излучения. Ранее, когда требовалось использование определенного цвета или длины волны света, это достигалось за счет использования белого света в паре с цветными фильтрами, которые со временем ухудшались и выходили из строя. Появление твердотельного освещения (ТТО) на основе светодиодов теперь позволяет производить эти длины волн без фильтров, создавая гораздо более точный, надежный и энергоэффективный продукт.

Использование белого света для освещения производственных помещений, в которых применяются светочувствительные материалы, не рекомендуется, поскольку значительная доля его излучения сосредоточена в коротковолновой области спектра (<500 нм), вызывающей разрушение таких материалов.

Разработанные нами светильники позволяют решить вышеуказанную проблему благодаря тому, что основная доля излучаемого ими света сосредоточена в диапазоне 500–700 нм, а доля излучения с длиной волны до 500 нм составляет менее 1 %.

Для получения желтых светодиодов использовались белые светодиоды с коррелированной цветовой температурой 5000 К, на которые наносились люминофорные микролинзы на основе желтого люминофора.

На рисунке 1 и в таблице 1 приведены спектры излучения образцов желтых светодиодов на основе белых светодиодов.

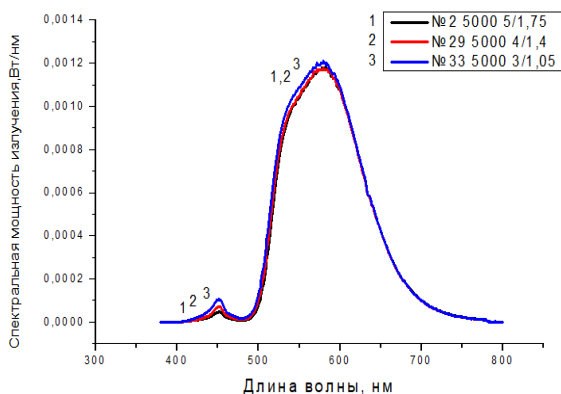


Рисунок 1 – Спектры излучения образцов желтых светодиодов на основе белых светодиодов 5000 К

Таблица 1. Характеристики желтых светодиодов на основе белых светодиодов 5000 К

№ образца	Вес линзы/люминофора, мг	Пик желтого излучения, нм	Светоотдача, лм/Вт	Состав спектра, С/З/К/дК, %	Чистота цвета
2	5/1,75	581	211,6	1,0/59,2/37,0/2,8	0,935
29	4/1,4	581	215,5	1,4/59,5/36,4/2,7	0,918
33	3/1,05	580	222,3	2,0/59,8/35,6/2,6	0,888

На основе полученных люминофорных светодиодов были разработаны и изготовлены светильники для освещения внутренних помещений с высоким требованием к низкому содержанию синей

составляющей в излучаемом спектре. Светильники имеют два различных форм фактора: первая модель представляет собой линейный промышленный светильник, вторая модель изготовлена в формате офисного светильника с креплением «армстронг».

Внешний вид светильников представлен на рисунке 2.

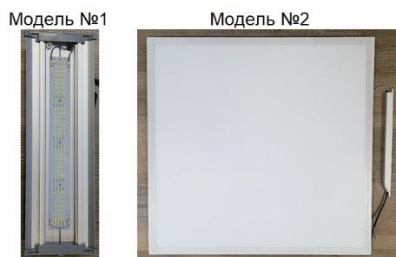


Рисунок 2 – Фотографии разработанных светильников

Разработанные светильники могут применяться в следующих областях:

- защита светочувствительных процессов (фотолитография) в полупроводниковой промышленности и нанотехнологиях;
- предотвращение повреждения светочувствительных ингредиентов в фармацевтическом производстве и компаундировании;
- предотвращение преждевременного затвердевания покрытий, улучшение их качества.

УДК 535.317; 681.7

АНАЛИЗ МЕТОДИК АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА ОБЪЕКТИВОВ С ПЕРЕМЕННЫМ ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ ДЛЯ ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Артюхина Н.К., Чергейко С.В., Шанчук В.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Проведен анализ методик автоматизированного синтеза ИК объективов с плавным изменением фокусного расстояния; установлены особенности габаритного расчета.

Ключевые слова: вариообъектив, фокусные расстояния, подвижки компонентов, качество изображения.

ANALYSIS OF AUTOMATED CALCULATION METHODS OF THE OPTICAL SYSTEM IR ZOOM LENS

Artioukhina N.K., Charheika S.V., Shanchuk V.A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The analysis of methods of automated synthesis of IR lenses with a smooth change of the focal length is carried out; the features of dimensional calculation are established.

Key words: zoom lens, focal length, component movements, image quality.

*Адрес для переписки: Чергейко С.В., ул. Макаёнка 25, г. Минск, 220114, Республика Беларусь
e-mail: ich0@bk.ru*

В современном оптическом приборостроении широко применяются объективы с переменным фокусным расстоянием, что подтверждается большим количеством публикаций, описывающих различные методы параксиального синтеза вариообъективов [1; 2]. Наиболее важен этап синтеза, на котором определяются конструктивные параметры оптической системы: радиусы

Преимуществами разработанных светильников являются низкое энергопотребление и высокая световая отдача, отсутствие цветных фильтров.

Технические характеристики светильников приведены в таблице 2.

Таблица 2. Технические характеристики

Характеристика, единица измерения	Модель	
	№ 1	№ 2
Потребляемая мощность, Вт	57	34
Коэффициент мощности	0,876	0,987
Световой поток, лм	8560	2968
Световая отдача, лм/Вт	150	89,5
Излучаемая мощность, Вт	20	7,6
Пиковая длина волны, нм	578	595
Доля «синего» света (в диапазоне менее 500 нм)	не более 1 %	
Габаритные размеры, мм	372×134×65	595×595×21

Литература

1. Yan, D.D. Highly efficient emission and high-CRI warm white light-emitting diodes from ligand-modified CsPbBr₃ quantum dots / D.D. Yan, S.Y. Zhao, Y.B. Zhang // Opto-Electron Adv. – 2022. – Vol. 5. – P. 200075.
2. Ma, Z.Z. Stable yellow light-emitting devices based on ternary copper halides with broadband emissive self-trapped excitons / Z.Z. Ma, Z.F. Shi // ACS Na. – 2020. – Vol. 14 (4). – P. 4475–4486.

кривизны поверхностей, толщины линз, осевые расстояния между ними, положение предмета и входного зрачка.

В работе проанализированы различные методы автоматизированного расчета оптических систем переменного увеличения. Одна группа методов основана на поиске в базе данных наиболее подходящего аналога и использовании его для

получения новой схемы; подход позволяет не выполнять параксиальный синтез, при этом не исключается возможность получения положительного результата. Другая группа методов основана на применении методов нелинейного программирования, при этом для реализации метода необходим трудоемкий патентный поиск для получения стартовой системы. Третья группа методов – это методы, основанные на разработке специализированных алгоритмов, учитывающих специфику решаемых задач.

Самым простым является метод проб [3], для использования которого необходима исходная оптическая система, взятая из патентов, архивов, литературных источников, обладающая близкими к требуемым характеристиками. Далее масштабируют, оптимизируют, увеличивают или уменьшают количество компонентов, разделяют склейки или т. д. с целью получения требуемого качества изображения. Данный метод требует интуиции и опыта оптика-расчетчика, занимает много времени и не всегда приводит к положительному результату. К тому же он не позволяет рассчитывать новые оптические системы, не имеющие аналога.

Широко распространенным методом при проектировании изображающих оптических систем является алгебраический метод расчета [4], основанный на применении теории аббераций третьего порядка. Производится синтез оптической системы из тонких компонентов путем решения алгебраических уравнений зависимостей коэффициентов аббераций третьего порядка от параметров оптической системы. При больших значениях относительного отверстия и поля зрения точность расчета уменьшается вследствие увеличения влияния аббераций высших порядков. Однако в ИК диапазоне большие значения длин волн позволяют применять данный метод для расчета светосильных и широкоугольных систем.

Композиционный метод основан на практическом опыте разработки оптических систем, когда учитываются свойства и возможности отдельных оптических элементов, сочетание которых обеспечивает компоновку оптической схемы для удовлетворения требований, предъявляемых к ней. Данный метод исключает существование в оптической схеме бесполезных элементов. Метод был предложен профессором М. М. Русиновым и получил развитие в его трудах [5]. По своей роли оптические элементы разделяются на силовые, коррекционно-силовые и коррекционные. Коррекция хроматических аббераций проводится за счет замены одиночных линз на склейки. Использование метода для расчета систем, работающих в ИК области спектра, осложнено отсутствием оптических клеев, прозрачных в данном диапазоне. Отметим, что и алгебраический метод и метод композиции на данный момент являются

комбинированными. Первый этап расчета заключается в получении стартовой системы, свободной от аббераций третьего порядка. На втором этапе производится оптимизация и автоматизированная коррекция аббераций [6].

При расчете сложных оптических систем, состоящих из нескольких разнесенных групп компонентов, наиболее целесообразно воспользоваться методом расчета по частям [1]. При этом оптическая система разделяется на отдельные части, каждая из которых рассчитывается отдельно, что позволяет упростить процессы сборки и юстировки системы.

Развитие композиционного метода проведено профессором Л.Н. Андреевым, предложен модульный принцип проектирования, основанный на синтезе схемы из оптических модулей с известными коррекционными свойствами [7]. В качестве модулей используются линзы с асферическими поверхностями, апланатические мениски и гиперхроматические линзы.

Достаточно интересной представляется современная методика [8], где предложено совместить габаритный и абберационный расчеты. Схема задается набором систем, соответствующим различным положениям компонентов. Токая система задается через углы α и высоты h первого параксиального луча, затем составляется оценочная функция, которая учитывает требования на параксиальные характеристики, ограничения на абберационные параметры тонких компонентов, требования к плавности хода подвижных компонентов. Далее полученная оценочная функция минимизируется в программном пакете Maple. Достоинством является то, что предложенный подход применим для параксиального расчета любых систем, не только переменного увеличения, однако не решает проблемы нахождения стартовой точки, тем более что в данном случае необходимо задать стартовую систему в определенных положениях, а не только в крайних. Наконец, алгоритм оптимизации может расходиться и не дать положительного решения.

К современным методикам отнесем методику А.Б. Оструна [9], суть которой заключается в определении оптических сил элементов базовой трехкомпонентной схемы с одним внутренним перемещающимся компонентом при заданном габарите системы. Такая схема позволяет добиться нужного перепада увеличения и сохранения положения плоскости изображения в двух крайних состояниях. Усовершенствование схемы проводится за счет расщепления одного из компонентов на два (с образованием четырехкомпонентной системы с двумя подвижными элементами) с целью обеспечения неподвижности изображения во всех состояниях. При необходимости может быть разделен на две части еще один из компонентов (с образованием пятикомпонентной системы с

тремя подвижными элементами), что позволяет обеспечить дополнительно неподвижность положение выходного зрачка. При использовании линз с переменными оптическими силами расщепление не производится, а у одного или несколько компонентов оптические силы считаются переменной величиной. На последнем этапе осуществляется расчет кинематики подвижных компонентов, либо расчет изменения оптических сил компонентов.

Следовательно, ни один из выше приведенных методов не позволяет полностью автоматизировать парааксиальный синтез центрированных оптических систем переменного увеличения. Поэтому исследование и разработка новых методов такого класса является актуальной научной и практической задачей.

Литература

1. Запрягаева, Л.А. Расчет и проектирование оптических систем / Л.А. Запрягаева, И.С. Свешникова. – М. : Логос, 2000. – 584 с.
2. Зверев, В.А. Идеи композиции как принцип построения рациональной конструкции оптической си-

стемы / В.А. Зверев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2002. – № 5. – С 56–71.

3. Бахолдин, А.В. Теория и методы проектирования оптических систем : уч. пособие / А.В. Бахолдин, Г.Э. Романова, Г.И. Цуканова; под редакцией А.А. Шехонина. – СПб., 2011. – 104 с.
4. Слюсарев, Г.Г. Методы расчета оптических систем / Г.Г. Слюсарев. – Л. : Машиностроение, 1969. – 670 с.
5. Русинов, М.М. Композиция оптических систем / М.М. Русинов. – Л. : Машиностроение, 1989. – 383 с.
6. Грамматин, А.П. Расчет и автоматизация проектирования оптических систем: уч. пособие / А.П. Грамматин, Г.Э. Романова, О.Н. Балащенко. – СПб., 2013. – 128 с.
7. Андреев, Л.Н., Модульное проектирование оптических систем / Л.Н. Андреев, В.В. Ежова, Г.С. Дегтярева // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2014. – Т. 57, вып. 3. – С. 57–62.
8. Крутман, С.А., Методика автоматизированного синтеза панкратических объективов в тонких компонентах / С.А. Крутман, В.Г. Поспехов // Сборник трудов международной конференции Прикладная оптика. – 2010. – Том 1. – С. 80–84.
9. Острун, А.Б. Разработка методов автоматизированного синтеза оптических систем переменного увеличения в гауссовой области // Дис. ... канд. техн. наук: 05.06.14 : Санкт-Петербург, 2014. – 104 с.

УДК 621.3.038.825.2

ИТТЕРБИЕВЫЙ ПЕТЛЕВОЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР В РЕЖИМЕ СИНХРОНИЗАЦИИ МОД

Шижко Т.А., Лазарчук А.И., Ясюкевич А.С., Кисель В.Э.

*НИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Исследованы особенности получения режима синхронизации мод в полностью волоконном петлевом лазере на основе активного одномодового иттербиевого волокна. Измерены выходные характеристики излучения: частота следования и спектральная полуширина световых импульсов, выходная мощность и центральная длина волны выходного излучения.

Ключевые слова: активное волокно, синхронизация мод, ионы иттербия, петлевой лазер, нелинейные эффекты.

MODE-LOCKED YTTERBIUM LOOP FIBER LASER Shishko T.A., Lazarchuk A.I., Yasukevich A.S., Kisel V.E.

*Center for Optical Materials and Technologies BNTU
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The features of mode-locking operation in an all-fiber loop laser based on active single-mode ytterbium fiber have been studied. The output characteristics of the radiation were measured: repetition frequency and spectral bandwidth of light pulses, output power and central wavelength of the output radiation.

Key words: active fiber, mode-locking, ytterbium ions, loop laser, nonlinear processes.

*Адрес для переписки: Кисель В.Э., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: vekisel@bntu.by*

Лазерное излучение с длиной волны 1–1,1 мкм имеет ряд достоинств, интересных для широкого практического применения в лазерной дальнометрии, медицине, системах оптической локации и спектрометрии благодаря целому ряду причин. В настоящее время существует большое количество источников лазерного излучения с длиной волны 1–1,1 мкм: волоконные лазеры, полупроводниковые лазеры, твердотельные лазеры. В последнее

время, благодаря простоте использования, надежности и компактности конструкции все больший интерес разработчиков лазерных систем привлекают иттербиевые волоконные лазеры. В настоящее время исследование и разработка иттербиевых волоконных лазеров, генерирующих ультракороткие лазерные импульсы (УКИ) в спектральной области 1–1,1 мкм представляет значительный интерес с точки зрения широкого

круга их практических применений (прецизионная обработка материалов, научные исследования, метрология и многое другое).

Схема исследованного лазера представлена на рисунке 1. Он состоит из нелинейного усиливающего петлевого зеркала (NALM-Nonlinear Amplifying Loop Mirror) и однонаправленного кольца (UR-Unidirectional Ring), соединенных волоконным разветвителем, с коэффициентом деления 70:30.

NALM представляет собой петлю состоящую из 0,15 м активного волокна с высокой концентрацией ионов иттербия (YDF-Hi; SM-YDF-5/130-VIII) которое накачивалось одномодовым полупроводниковым лазерным диодом (ЛД; BFLD-976F-6HSM-N0(1)) с длиной волны 976 нм через спектральный уплотнитель (WDM) и пассивного волокна (Hi 1060).

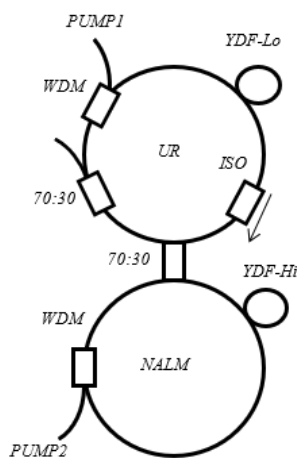


Рисунок 1 – Схема лазерного излучателя

Разветвитель выполняет роль насыщающегося поглотителя. Его принцип работы основан на интерференции двух частей разделенного импульса. За счет контролируемой величины разности фаз в NALM и UR возникают необходимые для получения режима синхронизации мод (СМ) эффекты, а именно то, что во вход разветвителя в который было заведено излучение, вернется менее интенсивная часть излучения, а во второй более интенсивная.

Для достижения большей разности фаз, которая возникает из-за нелинейного показателя преломления, итерферируемых импульсов (достижения большей глубины модуляции), используется высококонцентрированное иттербиевое волокно, смещенное к выходу с большим пропусканием. Вышеперечисленное позволяет «накопить» необходимую величину нелинейности, требуемую для просветления NALM. Также NALM до определенного значения интенсивности сокращает длительность проходящего через него импульса, что способствует стабилизации режима в резонаторе т. к. компенсирует действие дисперсий в элементах лазера, которые растягивают во времени импульс.

UR представляет собой петлю состоящую из WDM, 1,1 м активного волокна с низкой концентрацией ионов иттербия (YDF-Lo; SM-YSF-LO-HP) с накачкой полупроводниковым ЛД (BFLD-976F-6HSM-N0(1)) с длиной волны 976 нм, разветвителя 70:30 который выводит из резонатора 30 % излучения, пассивного волокна (Hi 1060) и волоконного изолятора на длину волны 1030 нм (ISO). UR обеспечивает положительную обратную связь для более интенсивного излучения и изолирует менее интенсивное.

Режим синхронизации мод достигался управлением величиной набега фаз в волокне за счет управления его положением. Выходное излучение лазера имело линейную поляризацию.

Зависимость выходной мощности от мощностей накачек в NALM и UR представлена на рисунке 2 и представляет собой полоску, это значит что резонатор находится в линейной области просветления NALM.

Поскольку элементы лазера соединены при помощи оптических розеток, которые вносят потери (порядка 5–10 %) на каждом соединении, это и позволило находиться в линейной области просветления. С увеличением накачки расширяется спектральная полуширина и центральная длина волны становится более длинноволновой.

При накачках по 0,5 Вт выходная мощность составила 46 мВт, спектральная полуширина – 7,3 нм (это обусловлено широкой полосой усиления иттербиевого волокна, нелинейными эффектами, которые проявляются за счет высокой интенсивности импульса в резонаторе и слабой спектральной селекцией элементов лазера), центральная длина волны – 1032,5 нм. Частота следования импульсов составила 14,4 МГц, что соответствует энергии одиночного импульса около 3,2 нДж. Спектральная полуширина допускает последующее внрезонаторное сжатие импульса до длительности менее 200 фс.

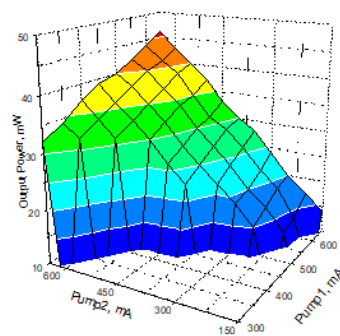


Рисунок 2 – Зависимость выходной мощности лазера от мощностей накачек NALM и UR

Простота конструкции предполагает возможность модификации резонатора дополнительными элементами, компенсирующими дис-

персию групповой скорости и дисперсию высших порядков, что позволит управление параметрами выходных лазерных импульсов для получения более широкого спектра генерации и соответствующего сокращения длительности сжатых импульсов. Также введение элементов контроля набега фаз в NALM и UR и использовании активных и пассивных волокон с сохранением поляризации (PM волокна) излучения позволит упростить получение режима синхронизации мод.

Варируя длину резонатора, потери на соединениях, и положение активного волокна можно

перестраивать резонатор на другую частоту следования импульсов, что полезно для различных прикладных задач.

Простота конструкции, отсутствие юстируемых элементов (за исключением положения оптоволокна), коммерческая доступность компонент излучателя и его компактность позволяют рассматривать этот лазер как затравочный лазер для систем регенеративного усиления УКИ имеющих широкое практическое применение как в научных исследованиях, так и для решения множества технологических задач.

УДК 621.383.72

ЭЛЕКТРОННЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ПРИБОРА С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ TCD1304DG

Щербаков Н.Г., Ивуть П.В., Сосенко В.А.

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

Аннотация. Описывается электронный модуль, предназначенный для формирования и обработки выходного сигнала ПЗС-линейки Toshiba TCD1304DG (ПЗС – прибор с зарядовой связью). Рассмотрен состав и особенности реализации электронного модуля.

Ключевые слова: ПЗС-линейка, электронный модуль, аппаратура для спектрофотометрирования.

ELECTRONIC MODULE FOR GENERATING AND PROCESSING THE OUTPUT SIGNAL OF A CHARGE-COUPLED DEVICE TCD1304DG

Shcherbakou M., Ivuts P., Sosenko V.

*A.N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physics Problems of BSU
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. An electronic module designed for generating and processing the output signal of the Toshiba TCD1304DG CCD line (a charge-coupled CCD device) is described. The composition and features of the implementation of the electronic module are considered.

Key words: CCD linear sensor, electronic module, spectrophotometry equipment.

*Адрес для переписки: Щербаков Н.Г., ул. Курчатова, 7, г. Минск, 220045, Республика Беларусь
e-mail: shcherbakov.niipfp-bsu.loes@mail.ru*

ПЗС-фотоприемники линейного типа имеют широкую сферу применения: от сканеров штрих-кодов и сканеров для документов до спектрофотометрической аппаратуры [1; 2]. Актуальными задачами отдела аэрокосмических исследований НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ являются разработка научной аппаратуры для спектрометрирования в оптическом диапазоне длин волн и ее использование для вопросов дистанционного зондирования Земли.

Для задач регистрации спектров исследуемых объектов в видимом спектральном диапазоне был разработан электронный модуль (ЭМ) спектрометра на основе ПЗС-линейки Toshiba TCD1304DG. Структурная схема электронного модуля представлена на рисунке 1. Модуль состоит из двух печатных плат: плата формирования выходного сигнала ПЗС-линейки и плата обработки данного сигнала.

ПЗС-линейка TCD1304DG представляет собой прибор, состоящий из 3648 высокочувствительных фотодиодов, расположенных в одну линию.

Каждый фотодиод регистрирует интенсивность падающего на его поверхность оптического излучения в видимом диапазоне длин волн, причем уровень аналогового сигнала фотодиода обратно пропорционален интенсивности оптического излучения. Схема дифференциального усилителя, включенная в состав ЭМ, предназначена для инвертирования выходного сигнала ПЗС-линейки (иными словами, чтобы малая интенсивность оптического излучения соответствовала малому уровню напряжения выходного сигнала ПЗС-линейки), а также для согласования диапазона напряжений выходного сигнала ПЗС-линейки с диапазоном напряжений преобразования аналого-цифрового преобразователя. С помощью внутренней схемы ПЗС-линейки, имеющей в своем составе сдвиговые регистры, сигнал с каждого фотодиода последовательно передается на выход ПЗС-линейки с частотой 500 кГц (в данном варианте ЭМ). Таким образом, выходной сигнал ПЗС-линейки представляет собой массив из 3648 аналоговых сигналов фотодиодов.

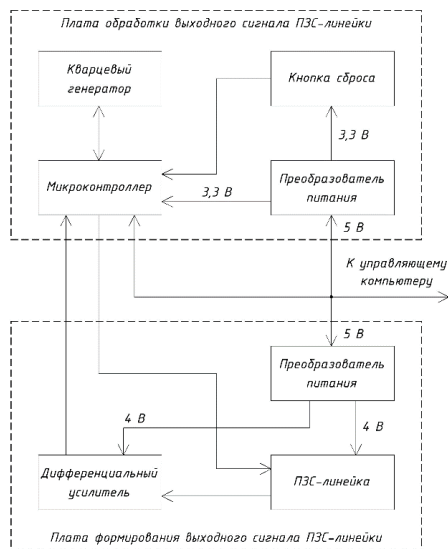


Рисунок 1 – Структурная схема электронного модуля для формирования и обработки выходного сигнала ПЗС-линейки TCD1304DG

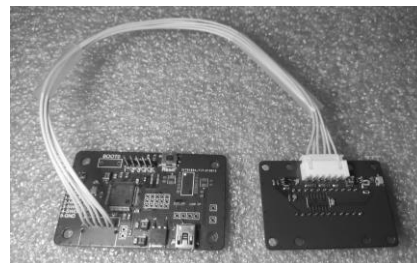
Для обработки массива аналоговых сигналов ПЗС-линейки TCD1304DG в состав ЭМ включен микроконтроллер (МК) STM32F405RG, содержащий аналого-цифровой преобразователь с разрешением 12 бит и скоростью преобразования 2,4 миллиона отсчетов в секунду. Для работы ПЗС-линейки требуется три управляющих сигнала: один тактирующий и два сигнала с функцией широтно-импульсной модуляции. Микроконтроллер STM32F405RG имеет в своем составе таймеры, используемые для управления ПЗС-линейкой (управление заключается в изменении экспозиции). Также используется модуль прямого доступа к памяти микроконтроллера, который записывает оцифрованные данные ПЗС-линейки в память МК без участия процессора микроконтроллера, что позволяет уменьшить нагрузку на процессор МК и, следовательно, ускорить работу ЭМ.

Управление электронным модулем, а также считывание его выходных данных осуществляется посредством интерфейса USB. Питание ЭМ предусмотрено от шины USB, соответственно напряжение питания ЭМ – 5 вольт. В соответствии с технической документацией на ПЗС-линейку TCD1304DG допускается напряжение ее питания со значением в 5 вольт, однако уровень выходного сигнала ПЗС-линейки зависит от значения напряжения ее питания [3]. По данным спецификации USB диапазон питающих напряжений: от 4,4 до 5,25 вольт (зависит от нагрузки, подключенной к шине), в котором шина сохраняет свою работоспособность [4], то есть нестабильность напряжения питания шины USB также создаст нестабильность уровня выходного сигнала ПЗС-линейки, поэтому в схеме предусмотрен линейный маломощный стабилизатор

напряжения на 4 вольта LT1761ES5-BYP. Рекомендуемое напряжение питания микроконтроллера STM32F405RG – 3,3 вольта, в соответствии с чем в состав схемы включен линейный регулятор напряжения на 3,3 вольта.

ЭМ подключается к управляющему компьютеру посредством USB-кабеля. На базе USB модуля микроконтроллера STM32F405RG реализован класс USB-устройства Communication Device Class (Virtual COM Port). Обмен сообщениями организован по схеме «запрос-ответ». Команды, которые принимает ЭМ от управляющего компьютера: изменение значения экспозиции в микросекундах; команда на передачу оцифрованных данных. Ответ на команду по передаче оцифрованных данных ЭМ отправляет в форме массива из 3648 элементов с разрядностью 12 бит.

Внешний вид ЭМ для формирования и обработки выходного сигнала ПЗС-линейки TCD1304DG представлен на рисунке 2.



а



б

Рисунок 2 – Внешний вид электронного модуля для формирования и обработки выходного сигнала ПЗС-линейки TCD1304DG: а – вид сверху; б – вид снизу

Литература

1. Трехдиапазонный маломассогабаритный спектро радиометр для спутников формата CubeSat / Б.И. Беляев [и др.] // Восьмой Белорусский космический конгресс: материалы конгресса. – 2022. – С. 115–118.
2. Портативный альбедометр для работы в удаленных районах. / Г.С. Литвинович [и др.] // Приборостроение – 2022. Материалы 15-й Международной научно-технической конференции. – 2022. – С. 398–399.
3. Техническое описание ПЗС-линейки TCD1304DG [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.spectralproducts.com/pdf/ToshibaTCD1304.pdf>.
4. Спецификация USB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.usb.org/document-library/usb-20-specification>.

УДК 618

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОПТИЧЕСКИХ КОММУНИКАЦИЙ ДЛЯ УНИВЕРСИТЕТСКОГО НАНОСПУТНИКА

Юдыцкая К.С., Лешкевич С.В., Саечников В.А.

Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе описываются перспективы построения и применения оптических каналов связи в аэрокосмических системах, исследуется возможность реализации оптических видов связи между спутниками и бортовыми системами внутри одного спутника. Проведенный эксперимент моделирует процесс кодирования, передачи и приема информации между бортовыми системами университетского наноспутника.

Ключевые слова: беспроводное соединение, оптический канал связи, внутрибортовые коммуникации.

MODELING OF AN OPTICAL COMMUNICATION SYSTEM FOR A UNIVERSITY NANOSATELLITE

Yudytskaya K., Liashkevich S., Saetchnikov V.

Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The paper presents the prospects for the construction and application of optical communication channels in aerospace systems, explores the possibility of implementing optical types of communication between satellites and in on-board satellite systems. The experiment simulates the process of encoding, transmitting and receiving information between the onboard systems of university nanosatellite.

Key words: wireless connection, optical communication channel, on-board communication system.

Адрес для переписки: Юдыцкая К.С., ул. Курчатова, 5, Минск 220108, Республика Беларусь
e-mail: kseniya.yudytskaya@gmail.com

Введение. Тенденцией развития летательных аппаратов всегда являлось стремление к оптимизации габаритно-энергетических характеристик. Наибольшее влияние данных параметров наблюдается при проектировании спутников, чем мотивированы многочисленные исследования, направленные на оптимизацию этих характеристик.

Организация оптического канала связи. Корректное совместное функционирование всех бортовых систем внутри малых космических аппаратов определяется качеством и надежностью системы коммуникаций между ними. В современных спутниках, как правило, существует необходимость организации связей между большим количеством отдельных управляющих систем и контроллеров, связанных с каждым отдельным модулем бортовой системы, что влечет за собой увеличение числа информационных каналов. Перспективным решением данной проблемы может стать организация альтернативных видов соединений, таких, как связь в оптическом диапазоне, способных устранить трудности проводных видов коммуникаций. Так, например, принцип «Fly-by-light» широко реализуется в военной и гражданской авиации, в качестве одного из технических наиболее выгодных решений. В такой трактовке данный принцип предусматривает использование волоконно-оптических линий связи, однако при организации связи на небольшие расстояния волоконная линия может быть заменена на полностью оптический беспроводной ка-

нал. Необходимо отметить, что применение находит возможность реализации оптических видов связи между спутниками одной группировки или между бортовыми системами внутри одного спутника.

Как правило, оптический канал связи для различных применений имеет структуру, представленную на рисунке 1.

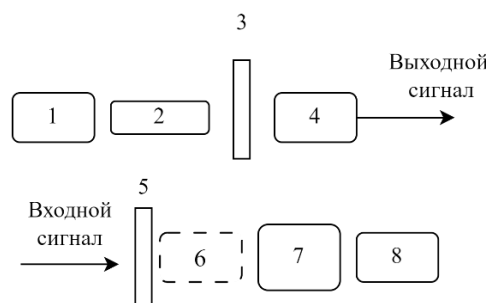


Рисунок 1 – Обобщенная структура оптической линии связи: 1 – модулятор; 2 – источник излучения; 3 – оптический фильтр; 4 – оптическая антенная система; 5 – оптический фильтр; 6 – усилитель; 7 – приемник излучения; 8 – демодулятор

При организации оптического канала связи прибегают как правило к модуляции по амплитуде или интенсивности путем прямой модуляции тока диода и использованию схемы прямого детектирования, а также используют преобразователи модуляции для обеспечения независимости от частоты и фазы несущей. Применение в оптическом диапазоне находит также поляризационная модуляция.

Частота несущей зависит от сферы использования реализуемого канала. Разработаны аппаратно-программные средства как для организации высокоскоростной модуляции в космической лазерной связи, так и более простые в реализации форматы с меньшей частотой. Длина волны излучения лазерных диодов, применяемых в оптических линиях связи, как правило, принадлежит диапазону 700–950 нм [1].

Система внутрибортовых коммуникаций. Использование беспроводных каналов для связи систем спутника между собой может иметь решающую роль при необходимости обеспечения минимального веса систем летательного аппарата. Среди беспроводных видов соединений оптический канал связи может быть организован при использовании наиболее простых интерфейсов и способов модуляции. Кроме того, обеспечение связи при помощи беспроводных видов соединений позволяет избежать вредоносного влияния наводимых электромагнитных полей. Модули для обеспечения оптической связи характеризуются, как правило, меньшим энергопотреблением, что также имеет важную роль при проектировании малых космических аппаратов.

На рисунке 2 представлена модель студенческого наноспутника BSUSAT-2 формата 3U, имеющего слотовую компоновку, и расположение различных систем внутри него. Следует отметить небольшое расстояние между модулями, позволяющее передать сигнал даже с помощью диода небольшой мощности. Таким образом, возможна организация оптического канала для связи между системами внутри одного наноспутника. Данная система предлагается к использованию для передачи по командной линии информации, представленной простыми сигналами небольшой длительности. Это позволяет максимально упростить используемый интерфейс и обеспечить наименьший вес приемопередающей аппаратуры.

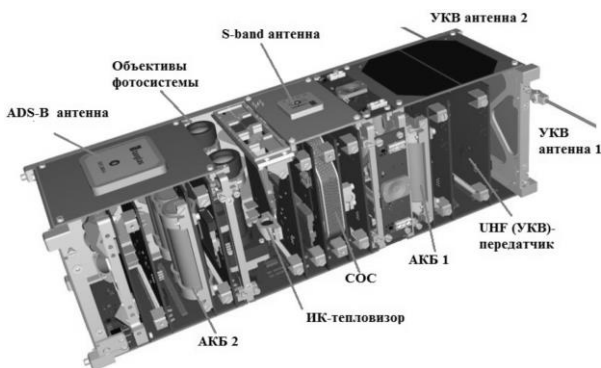


Рисунок 2 – Схема расположения модулей наноспутника

Моделирование процесса передачи. Для экспериментального моделирования процесса передачи информации использовался светодиод с углом расходимости излучения $\theta = 20^\circ$ и кремниевый фотоприемник с площадкой $S = 1 \text{ мм}^2$, установленные на макетной плате на расстоянии $l = 1 \text{ см}$, а программная часть схемы предложена к реализации на базе графической среды разработки программ LabView. Часть схемы, выполняющей обработку принятого сигнала, представлена на рисунке 3.

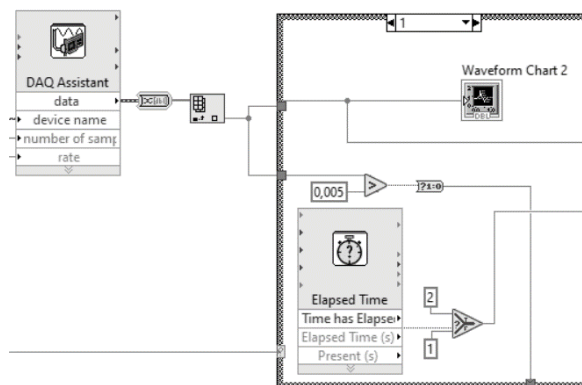


Рисунок 3 – Схема, осуществляющая управление приемом сигнала в LabView

На этапе моделирования выполнялась передача и детектирование сигнала, представляющего собой двоичную последовательность длительностью 8 бит – формат, с помощью которого представимы многие сигналы, которые могут быть использованы для передачи информации между системами спутника. Из передаваемой последовательности выделяется информационная составляющая, после чего происходит ее запись и дальнейшее декодирование.

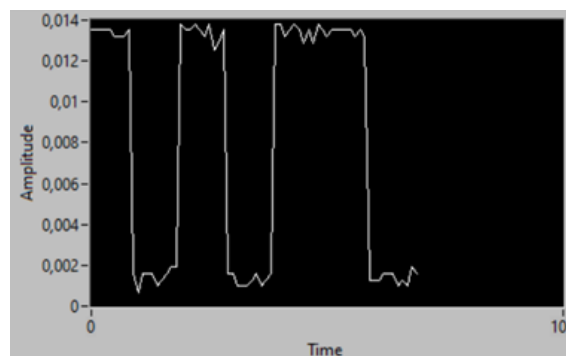


Рисунок 4 – Осциллограмма принятого сигнала

Литература

1. Аксененко, М.Д. Приемники оптического излучения: справочник / М.Д. Аксененко, М.Л. Бараночников. – М. : Радио и связь, 1987. – 296 с.

УДК 681.7.023.72

ДВУСТОРОННЯЯ ОБРАБОТКА ДВОЯКОВЫПУКЛЫХ ЛИНЗ
Козерук А.С., Кузнецик В.О., Шевченко В.П., Якубович Т.С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработана математическая модель, позволяющая с помощью ЭВМ выявить наиболее выгодные параметры процесса одновременной двусторонней обработки прецизионных двояковыпуклых линз с точки зрения достижения высокой производительности формообразования и минимальных значений кинематической составляющей локальных погрешностей на исполнительных поверхностях детали.

Ключевые слова: линза, устройство, пути трения, режимы обработки.

DOUBLE-SIDED PROCESSING OF DOUBLE-CONVEXED LENSES
Kozeruk A.S., Kuznechik V.O., Shevchenko V.P., Yakubovich T.S.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Mathematical model is developed, that allow to discover using computer the most efficient parameters of the simultaneous double-sided biconvex lenses processing, from the point of high shaping productivity implementation and minimum local error kinematic component achievement on the details working surfaces.

Key words: lens, device, friction paths, processing modes.

Адрес для переписки: Кузнецик В.О., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: v-kuzn@tut.by

В настоящее время в оптическом приборостроении используется технология односторонней обработки линз, согласно которой заготовку детали закрепляют на приспособление наклейным веществом каждой из исполнительных поверхностей [1]. Данный процесс блокировки сопровождается нагревом наклейного вещества и заготовки, при остывании которых вследствие различных температурных коэффициентов расширения возникает деформация заготовки. Если заготовку, находящуюся в напряженном состоянии, обработать с требуемой точностью, после разблокировки напряжения в стекле релаксируют и достигнутая форма полированной поверхности искажается. Кроме того, поскольку в качестве наклейного вещества используется смола, при нагреве которой выделяются канцерогенные вещества фенольной группы, имеет место загрязнение окружающей среды.

Отмеченных недостатков лишена технология одновременной двусторонней обработки линз, которая позволяет сократить, по меньшей мере, в два раза время обработки и повысить качество деталей по чистоте их полированных поверхностей. Последнее обстоятельство обусловлено исключением из технологического процесса ряда вспомогательных операций (например, блокировки и разблокировки), где часто происходит повреждение (нанесение царапин, выколок и т. п.) исполнительных поверхностей линзы.

Для реализации предлагаемой технологии разработано устройство [2], которое монтируется на серийные шлифовально-полировальные или полировально-доводочные станки мод. ШПП или ПД. Устройство состоит из штанги 1 (рисунок 1),

связанной с приводом возвратно-вращательных перемещений 2, дополнительных штанг 3, 4, установленных с возможностью возвратно-вращательных перемещений на стойках 5, 6 и с помощью кареток 7, 8 с рамками 9, 10, кинематически связанными со штангой 1. На дополнительных штангах 3, 4 закреплены державки 11, 12, несущие звенья давления, включающие в себя кронштейны 13, 14, с которыми шарнирно соединены двуплечие рычаги 15, 16 с грузами 17, 18. Двуплечие рычаги 15, 16 взаимодействуют с поводками 19, 20, которые установлены с возможностью осевого перемещения в державках 11, 12 и находятся в силовом замыкании с инструментами 21, 22, контактирующими с деталью 23. Последняя помещена в приводе детали с возможностью относительного вращения. Привод детали состоит из ведущего 24, опорного 25 и прижимного 26 роликов, первые два из которых жестко закреплены на направляющей 27, а последний установлен с возможностью перемещения вдоль данной направляющей. При этом с ведущим роликом 24 неподвижно связано колесо 28, находящееся во фрикционном взаимодействии с планшайбой 29, закрепленной на шпинделе 30 базового станка.

Устройство работает следующим образом. Деталь 23 помещают на ведущий 24 и опорный 25 ролики и фиксируют ее на этих роликах прижимным роликом 26 посредством его смещения на направляющей 27 в сторону роликов 24, 25 (последний на рисунке 1 не показан). Затем на деталь устанавливают инструменты 21, 22, помещают в них поводки 19, 20 и приводят их в силовое замыкание с инструментами посредством двуплечих рычагов 15, 16 и грузов 17, 18. Далее стойки 5, 6

помещают в центре кривизны обрабатываемых сферических поверхностей детали 23, в соответствующих местах на дополнительных штангах 3, 4, зависящих от требуемой величины амплитуды возвратно-вращательного перемещения инструментов 21, 22, закрепляют каретки 7, 8 и сообщают движение шпинделю 30 и приводу возвратно-вращательных перемещений 2 штанги 1. В процессе обработки детали управление ее формообразованием осуществляют изменением величины амплитуды возвратно-вращательных перемещений инструментов 21, 22 посредством смещения кареток 9, 10 вдоль оси дополнительных штанг 3, 4.

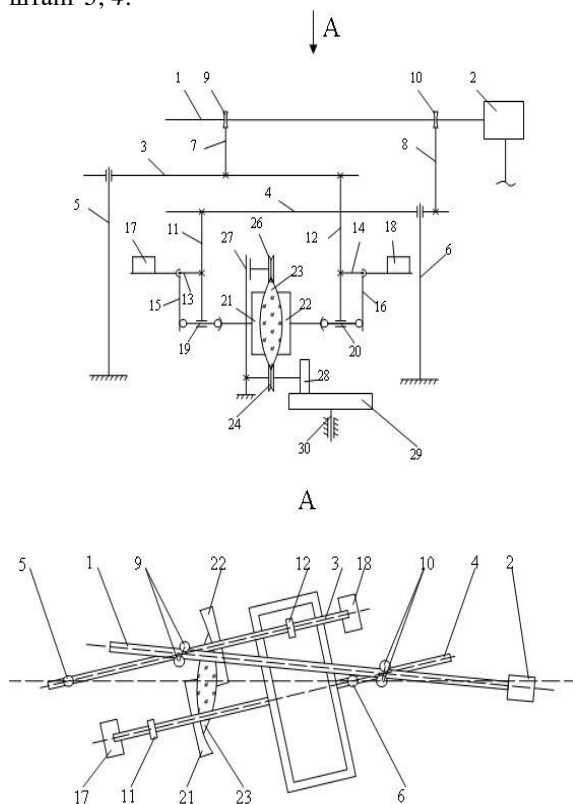


Рисунок 1 – Кинематическая схема устройства для одновременной двусторонней обработки двояковыпуклых линз

Обработка на устройстве происходит в условиях свободного притирания, поэтому величину таких наладочных параметров, как амплитуд A_1 и A_2 возвратно-вращательных перемещений инструментов, а также скоростей вращения детали ω_d и входного звена исполнительного механизма базового станка ω_2 в каждом конкретном случае

определяет рабочий-оптик методом подбора, исходя из своего опыта и интуиции. С целью уменьшения затрат времени на поиск наиболее выгодных режимов работы технологического оборудования выполнено математическое моделирование процесса обработки, которое позволяет с помощью ЭВМ рассчитать характер распределения путей трения (резания) l точки детали относительно инструмента в зависимости от величины отмеченных наладочных параметров.

При определении путей трения l на каждой из поверхности детали выделяли M_{ij} опорных точек, представляющих собой пересечение i – й концентрической окружности с j -м лучом (радиальным сечением), вычисляли координаты этих точек, которые в нашем случае равны

$$\begin{cases} X_{M_{ij}} = R \sin \gamma_i \cos \beta_i, \\ Y_{M_{ij}} = R \sin \gamma_i \sin \beta_i, \\ Z_{M_{ij}} = R \cos \gamma_i, \end{cases} \quad (1)$$

где $i, j = 1, K$; $\gamma = \arcsin d_n/2R$, d_n – диаметр линзы; R – радиус кривизны ее сферической поверхности.

По известному времени обработки рассчитывали траекторию движения опорной точки относительно поверхности инструмента. Для этого координаты опорной точки M_{ij} , заданной системой уравнений (1) в неподвижной системе координат (СК) $OXYZ$, преобразовывали в координаты точки в СК $OX_1Y_1Z_1$, начало которой, как и СК $OXYZ$, расположено в центре обрабатываемой сферической поверхности, а ось OZ_1 совпадает с осью вращения инструмента и вместе с ним совершает возвратно-вращательное движение вокруг оси OY_1 . Преобразование проводили, согласно уравнения

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ X_1 \\ 1 \end{pmatrix} |M_{Zn}||M_Y||M_{Zd}| \begin{pmatrix} X_{M_{ij}} \\ Y_{M_{ij}} \\ Z_{M_{ij}} \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $|M_{Zn}||M_Y||M_{Zd}|$ – матрица вращения вокруг соответствующих осей СК $OX_1Y_1Z_1$ [3].

Литература

1. Технология оптических деталей / Зубаков В.Г. [и др.]. – М., 1985.
2. Устройство для одновременной двусторонней обработки оптических деталей с выпуклыми поверхностями : заявка на изобретение № а20041220 / А.С. Козерук [и др.]. – Оpubл. 23.12.04.
3. Козерук, А.С. Формообразование прецизионных поверхностей. – Минск, 1997.

УДК 535.37

**СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ФАЗЫ
В СВИНЦОВО-ГЕРМАНАТНЫХ ОКСИФТОРИДНЫХ СТЕКЛАХ, АКТИВИРОВАННЫХ
ИОНАМИ ИТТЕРБИЯ И ЭРБИЯ**

Ясюкевич А.С.¹, Кисель В.Э.¹, Шишко Т.А.¹, Трусова Е.Е.², Захаревич Г.Б.²

¹НИЦ ОМТ БНТУ

²Белорусский государственный технологический университет,

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Изучены спектры поглощения, люминесценции и комбинационного рассеяния свинцово-германатных оксифторидных стекол, активированных ионами иттербия и эрбия до и после вторичной термообработки. Обнаружена корреляция между изменениями в спектрах ап-конверсионной люминесценции ионов эрбия и комбинационного рассеяния в образцах стекол с высоким содержанием оксида эрбия и появлением пиков в рентгенограммах после отжига этих образцов, которые указывают на образование в них кристаллической фазы PbF₂.

Ключевые слова: свинцово-германатные оксифторидные стекла, ионы Er³⁺, Yb³⁺, стеклокерамика с PbF₂.

**SPECTROSCOPIC MANIFESTATIONS OF THE FORMATION OF THE CRYSTAL PHASE
IN LEAD-GERMANATE OXYFLUORIDE GLASSES ACTIVATED BY YTTERBIUM
AND ERBIUM IONS**

Yasukevich A.S.¹, Kisel V.E.¹, Shishko T.A.¹, Trusova E.E.², Zakharevich G.B.²

Center for Optical Materials and Technologies BNTU

Belarusian State Technological University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The absorption, luminescence and Raman spectra of lead-germanate oxyfluoride glasses activated with ytterbium and erbium ions before and after secondary heat treatment were studied. A correlation was discovered between changes in the upconversion luminescence spectra of erbium ions and Raman scattering in glass samples with a high content of erbium oxide and the appearance of peaks in the X-ray diffraction patterns after annealing of these samples, which indicate the formation of a PbF₂ crystalline phase in them.

Key words: lead-germanate oxyfluoride glasses, spectroscopic properties of Er³⁺ and Yb³⁺ ions, glass ceramics.

*Адрес для переписки: Ясюкевич А.С., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: anatol@bntu.by*

Оксифторидные стеклокерамические материалы, активированные ионами редкоземельных элементов представляют большой интерес для использования в оптоэлектронике, например, как датчики температуры, для разработки устройств отображения информации. Такие материалы обладают высоким значением квантового выхода люминесценции как в инфракрасной, так и в видимой областях спектра, что обусловлено низкими значениями фоонов фторидов. С другой стороны, стеклянная матрица обеспечивает высокую механическую и химическую стабильность таких стеклокерамических материалов [1].

В данной работе сообщается о результатах синтеза свинцово-германатных оксифторидных стекол, получения стеклокерамики на их основе, изучения спектральных характеристик, исследуемых материалов, и данных рентгенофазового анализа.

Стекла имели следующий состав – SiO₂-GeO₂-PbO-PbF₂-CdF₂-YbF₃-Er₂O₃. Синтез осуществлялся при 950 °С, с выдержкой при максимальной температуре в течение 30 мин. Отжиг стекол проводился в электрической муфельной печи при температуре 300 °С. Содержание YbF₃ было постоянным – 1,0 моль. %, а содержание Er₂O₃

варьировалось: 1,0 моль. %, 0,5 моль. %, 0,25 моль. %, 0,1 моль. % и 0,05 моль. %. Далее эти стекла подвергались вторичной термообработке в течение 5 часов при температуре 420 °С, близкой к температуре стеклования, для формирования в них кристаллической фазы. Результаты анализа характеристик полученных стеклокерамик будут представлены на примере образцов с максимальным содержанием Er₂O₃ – 1,0 моль. % (образец N1) и минимальным содержанием – 0,05 моль. % (образец N5).

На первом этапе были изучены характеристики вновь приготовленных стекол. Спектры поглощения и стационарной люминесценции, в том числе и ап-конверсионной (АПЛ), демонстрируют типичный набор бесструктурных спектральных линий, характерных для иттербий-эрбиевых стекол. Спектры комбинационного рассеяния (КР) и рентгенограммы полученных стекол также являются диффузными. На рисунках 1 и 2 в качестве примера приведены спектры КР синтезированных стекол и спектры АПЛ ионов эрбия.

После вторичной термообработки спектры КР и АПЛ для стекол с высоким содержанием оксида эрбия стали более структурированными, что

указывает на большую упорядоченность матрицы, рисунки 3 и 4.

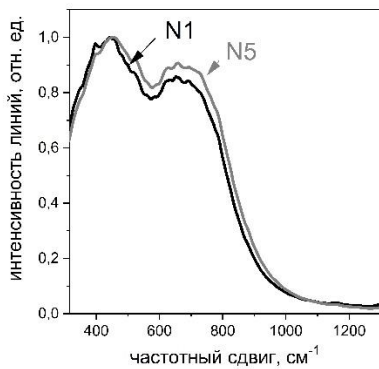


Рисунок 1 – Спектры КР образцов стекол N1 и N5

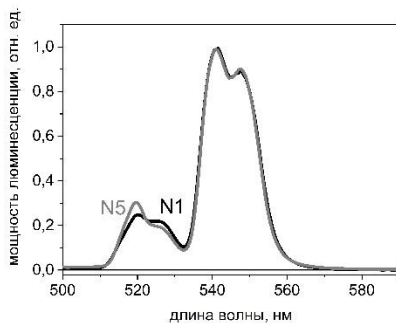


Рисунок 2 – Спектры АПЛ образцов стекол N1 и N5. Переходы ${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ (≈ 520 нм) и ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ (≈ 545 нм)

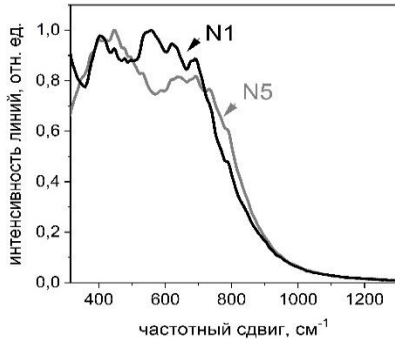


Рисунок 3 – Спектры КР образцов N1 и N5 после вторичной термообработки

Эти изменения в спектрах коррелируют с данными рентгенофазового анализа для этих образцов, рисунки 5 и 6, где для образца N1 обнаруживаются рефлексы, характерные для кристаллов β - PbF_2 [1].

Следует отметить, что спектры поглощения ионов иттербия и эрбия, а также спектры их люминесценции в инфракрасной области не претерпевают заметных изменений после вторичной термообработки стекол.

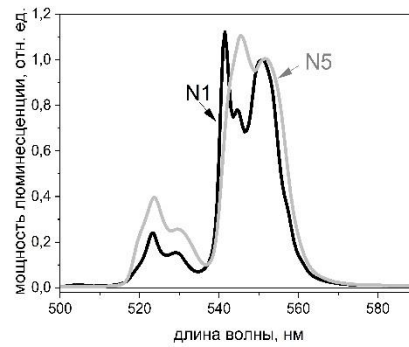


Рисунок 4 – Спектры АПЛ образцов N1 и N5 после вторичной термообработки. Переходы ${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ (≈ 520 нм) и ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ (≈ 545 нм)

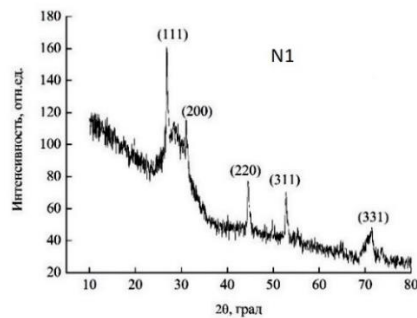


Рисунок 5 – Рентгенограмма для образца N1 после вторичной термообработки

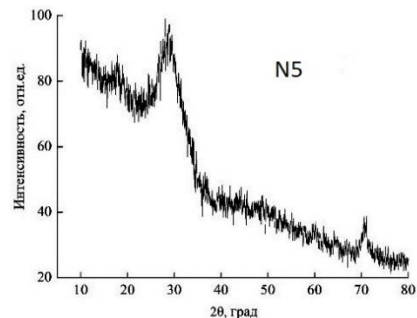


Рисунок 6 – Рентгенограмма для образца N5 после вторичной термообработки

Таким образом, установлены спектроскопические признаки, структуризация спектров КР и АПЛ, появления кристаллической фазы PbF_2 при вторичной термообработке свинцово-германатных оксифторидных стекол, активированных ионами иттербия и эрбия.

Литература

1. Ур-конверсионная люминесценция оксифторидной стеклокерамики с нанокристаллами $PbF_2:(Yb^{3+}, Eu^{3+}, RE^{3+})$ (RE = Tm, Ho или Er) / Е. Вилейшикова [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2016. – Т. 83. – С. 678–685.

УДК 535.327;535/012

ЭФФЕКТ ПРОДОЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ АКТИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ МОНОКЛИННОГО КРИСТАЛЛА ИТТРИЕВОГО ОКСИОРТОСИЛИКАТА

Юмашев К. В., Герцова А.В., Мальяревич А.М.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Исследован эффект продольной деформации для активных лазерных элементов из моноклинного кристалла оксиортоосиликата иттрия различной вырезки. Рассмотрена геометрия продольной накачки. Определены атермальные вырезки активных элементов из данного кристалла, при которых термическая линза является положительной и характеризуется низким астигматизмом.

Ключевые слова: активные лазерные элементы, моноклинный кристалл оксиортоосиликата иттрия, деформация.

END-BULGING EFFECT FOR ACTIVE LASER ELEMENTS BASED ON A MONOCLINIC CRYSTAL OF YTTRIUM OXYORTHOSILICATE

Yumashev K.V., Hertsova A.V., Malyarevich A.M.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. End-bulging effect for monoclinic yttrium oxyorthosilicate crystal of different cutting is investigated. The geometry of longitudinal pumping is considered. The athermal directions for active elements from yttrium oxyorthosilicate crystal, at which thermal lens is positive and characterized by low astigmatism, are determined.

Keywords: active laser elements, monoclinic crystal of yttrium oxyorthosilicate, deformation.

*Адрес для переписки: Юмашев К.В., пр. Независимости, 65/17, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: kyumashev@bntu.by*

Оксиортоосиликат иттрия Y_2SiO_5 (YSO), активированный редкоземельными ионами (RE^{3+}), такими как неодим, иттербий, эрбий, тулий [1] используется в качестве лазерных кристаллов для генерации непрерывного и импульсного (в том числе фемтосекундного) излучения. Трехвалентные ионы редких земель в кристалле YSO характеризуются большим штарковским расщеплением основного состояния (472 см^{-1} для ионов неодима, 985 см^{-1} для ионов иттербия, 1000 см^{-1} для ионов тулия), которое выше, чем в других лазерных кристаллах, легированных ионами RE^{3+} . Это приводит к тому, что термическая населенность верхнего лазерного уровня становится низкой, и лазеры на кристаллах $RE^{3+}:YSO$ приближаются к лазерам, работающим по четырехуровневой схеме. В результате порог генерации существенно снижается, а сечение вынужденного излучения имеет широкую полосу, что особенно важно для получения широкого диапазона перестройки длины волны генерации, а также сверхкоротких импульсов фемтосекундной длительности.

Под действием оптической накачки в лазерном активном элементе происходит выделение тепла, что приводит к его неоднородному нагреву. Это приводит к изменению показателя преломления в поперечном сечении активного элемента, в результате чего лазерный кристалл по отношению к проходящему через него свету становится линзоподобным. Говорят, что в лазерном активном элементе возникает термическая линза (ТЛ). Следствием возникновения ТЛ является па-

дение выходной мощности лазера, ухудшение качества его пучка и деполяризация излучения. ТЛ моноклинных кристаллов, к которым относится YSO, проявляют сильную анизотропию, зависящую от вырезки кристалла (направления распространения в нем излучения) и поляризации света. В связи с этим в кристалле существует так называемые атермальные направления (AD).

В настоящей работе, представлено исследование продольной деформации (краевых эффектов) для активных лазерных элементов из моноклинного кристалла YSO различной вырезки при продольной накачке, основанное на решении задачи термических напряжений и деформаций с учетом анизотропии оптических, тепловых и упругих свойств кристалла, и определение на этой основе атермальных вырезок кристалла.

Кристалл YSO относится к моноклинной сингонии, пространственной группе симметрии $C2/c$, и является анизотропным оптически двуосным кристаллом. Параметры элементарной ячейки $a \neq b \neq c$, углы $a \wedge b = b \wedge c = 90^\circ$, $a \wedge c = 122,2^\circ$ (a , b , и c – кристаллографические оси). Свойства моноклинного кристалла описываются с помощью правой прямоугольной кристаллофизической системы координат $\{x, y, z\}$, в которой оси y и z параллельны соответственно осям b , и c , а ось x лежит в плоскости $a-c$ (рисунок 1, a). В свою очередь для описания оптических свойств моноклинного кристалла используются ортогональные оси оптической индикатрисы N_p , N_m и N_g , при этом ось b параллельна оси N_p , а оси N_m и N_g

находятся в плоскости $a-c$ (рисунок 1, a). Острый угол между направлениями осей $z = c$ и N_g составляет $11,35^\circ$, а между направлениями осей a и N_m равен $20,85^\circ$ (рисунок 1, a).

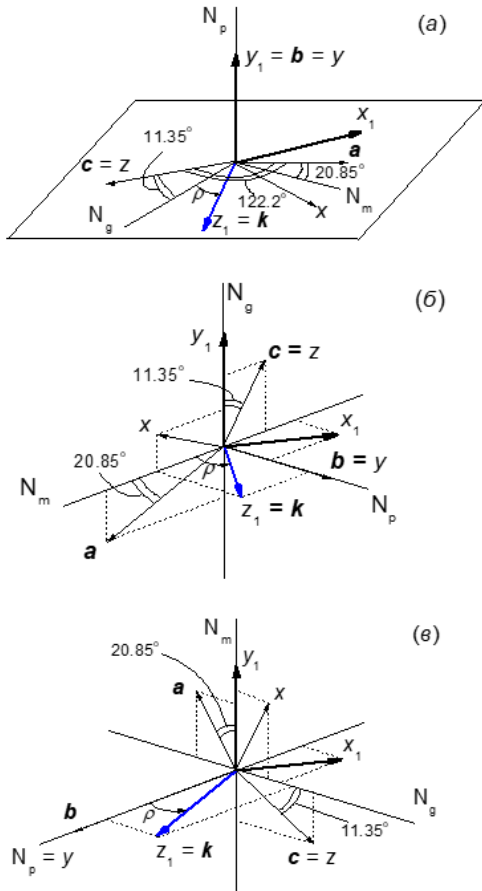


Рисунок 1 – Взаимная ориентация кристаллографических a, b, c и кристаллофизических осей x, y, z , осей оптической индикатрисы N_p, N_m, N_g и осей x_1, y_1, z_1 рабочей системы координат для моноклинного кристалла YSO трех типов вырезки, k – направление распространения света

В настоящей работе рассматриваются три типа вырезки кристалла, при которых направление распространения света k находится в плоскостях N_m-N_g (рисунок 1, a), N_p-N_m (рисунок 1, b) и N_p-N_g (рисунок 1, c) и характеризуется различным углом ρ , направление отсчета которого и ось, от которого от отсчитывается, показаны на рисунке 1 (a) (ρ_{gm} -вырезка кристалла), рисунок 1 (b) (ρ_{mr} -вырезка) и рисунок 1 (c) (ρ_{pg} -вырезка). Рассматривается свет с длиной волны $546,1$ нм, имеющий поляризацию для ρ_{gm} -вырезки $E//N_p$, для ρ_{mr} -вырезки – $E//N_g$, для ρ_{pg} -вырезки – $E//N_m$. Расчеты выполняются в рабочей прямоугольной правой системе координат $\{x_1, y_1, z_1\}$ (рисунок 1), в которой ось z_1 совпадает с направлением распространения света для всех вырезок кристалла, а выбор осей x_1, y_1 произволен.

Активный лазерный элемент имеет форму диска с радиусом r_0 , который значительно меньше

его толщины L_0 , лазерное излучение распространяется вдоль оси этого диска (рисунок 2). Рассматривается продольная накачка, для которой распределение температуры в плоскости диска можно считать параболическим: $T(x_1, y_1) = T(0) - \Delta T \frac{x_1^2 + y_1^2}{r_0^2}$, где ΔT – разность температур в центре $T(0)$ и на границе $T(r_0)$ диска. Вследствие круговой симметрии активного элемента результаты расчетов анализируются в цилиндрической системе координат $\{r, \theta, z_1\}$, $r^2 = x_1^2 + y_1^2$ (рисунок 2).

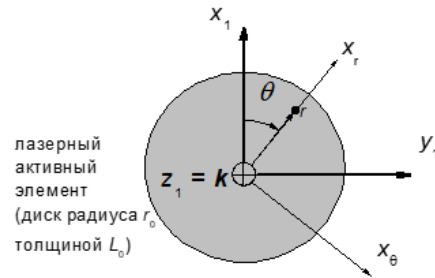


Рисунок 2 – Взаимная ориентация осей рабочей $\{x_1, y_1, z_1\}$ и цилиндрической $\{r, \theta, z_1\}$ систем координат для лазерного активного элемента в форме диска

Оптическая сила ТЛ в активном элементе с учетом вклада двух эффектов – зависимости показателя преломления материала активного элемента от температуры (описываемого температурным коэффициентом показателя преломления dn/dT) и продольной деформации активного элемента – определяется формулой

$$D = \frac{2L_0\Delta T}{r_0^2} \left[\frac{dn}{dT} - \frac{(n-1)r_0^2}{2\Delta T} \frac{d^2\varepsilon_{z_1}(r)}{dr^2} \right],$$

где $\varepsilon_{z_1}(r)$ – компонента деформаций, описывающая растяжения вдоль оси z_1 , Величина

$$\Delta = \left[\frac{dn}{dT} - \frac{(n-1)r_0^2}{2\Delta T} \frac{d^2\varepsilon_{z_1}(r)}{dr^2} \right],$$

которая определяется только параметрами материала активного элемента, называется «обобщенным» термо-оптическим коэффициентом. В этом выражении член

$$\Delta_{EB} = - \frac{(n-1)r_0^2}{2\Delta T} \frac{d^2\varepsilon_{z_1}(r)}{dr^2}$$

определяет вклад в ТЛ эффекта продольной деформации активного элемента, связанной с термическими напряжениями и с чистым тепловым растяжением. Вклад в оптическую силу ТЛ еще одного эффекта – фотоупругого – рассматриваться не будет, поскольку для этого необходимо знание полного набора упруго-оптических постоянных, информация о которых в настоящее время отсутствует, а учет двух остальных эффектов позволяет сделать вывод о знаке ТЛ, что особенно важно при проектировании лазеров в микрочип конфигурации.

Компонента деформаций ε_{z_1} находится с помощью обобщенного закона Гука, которое в матричной форме записывается как $\varepsilon_i = S'_{ij}\sigma_j + \alpha'_i T(x_1, y_1)$ ($i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$). Здесь $\varepsilon_i, \sigma'_j, \alpha'_i$ и S'_{ij} – соответственно коэффициенты деформации,

напряжения, теплового расширения и упругой податливости в рабочей системе координат $\{x_1, y_1, z_1\}$ в матричных обозначениях. В соответствии с геометрией активного элемента рассматриваются средние по толщине диска компоненты напряжения и деформации, при этом величиной нормальной компоненты напряжения $\sigma_3 = \sigma_{z_1}$ пренебрегается по сравнению с другими составляющими напряжения. В [2] были получены коэффициенты напряжения для анизотропного кристалла произвольной сингонии, представляющего собой круговой цилиндр. Используя эти решения, можно получить выражения для коэффициентов напряжения в рассматриваемой задаче:

$$\begin{aligned} \sigma_1 = \sigma_{x_1} &= \frac{\Delta T}{r_0^2} A(\rho)(x_1^2 + 3y_1^2 - r_0^2); & \sigma_3 = \sigma_{z_1} &= 0; \\ \sigma_2 = \sigma_{y_1} &= \frac{\Delta T}{r_0^2} A(\rho)(3x_1^2 + y_1^2 - r_0^2); & \sigma_6 = \sigma_{x_1 y_1} &= -\frac{\Delta T}{r_0^2} A(\rho)x_1 y_1; \\ \sigma_4 = \sigma_{y_1 z_1} &= \frac{\Delta T}{r_0^2} [B(\rho)(3x_1^2 + y_1^2 - r_0^2) - 2C(\rho)x_1 y_1]; \\ \sigma_5 = \sigma_{x_1 z_1} &= \frac{\Delta T}{r_0^2} [C(\rho)(x_1^2 + 3y_1^2 - r_0^2) - 2B(\rho)x_1 y_1], \end{aligned}$$

где коэффициенты $A(\rho)$, $B(\rho)$ и $C(\rho)$ определяются коэффициентами упругой податливости S'_{ij} и теплового расширения α'_i и определяются выражениями:

$$\begin{aligned} A(\rho) &= \frac{(\alpha'_1 + \alpha'_2)(s_2 s_3 - s_1^2) + 2\alpha'_4(s_1 s_4 - s_3 s_5) + 2\alpha'_5(s_1 s_5 - s_2 s_4)}{s_6(s_2 s_3 - s_1^2) + s_5(s_1 s_4 - s_3 s_5) + s_4(s_1 s_5 - s_2 s_4)}; \\ B(\rho) &= \frac{A(\rho)(s_1 s_4 - s_3 s_5) + 2(s_3 \alpha'_4 - s_1 \alpha'_5)}{s_2 s_3 - s_1^2}; \\ C(\rho) &= \frac{A(\rho)(s_1 s_5 - s_2 s_4) - 2(s_1 \alpha'_4 - s_2 \alpha'_5)}{s_2 s_3 - s_1^2}; \\ s_1 &= 2S'_{45}; & s_2 &= 3S'_{44} + S'_{55}; & s_3 &= S'_{44} + 3S'_{55}; \\ s_4 &= 3S'_{15} + S'_{25} + S'_{46}; & s_5 &= 3S'_{14} + 3S'_{24} + S'_{56}; \\ s_6 &= 3S'_{11} + 3S'_{22} + 2S'_{12} + S'_{66}; \\ \alpha'_1 &= \alpha'_{x_1}; & \alpha'_2 &= \alpha'_{y_1}; & \alpha'_3 &= \alpha'_{z_1}; \\ \alpha'_4 &= \alpha'_{y_1 z_1}; & \alpha'_5 &= \alpha'_{x_1 z_1}. \end{aligned}$$

Компонента деформаций ε_{z_1} в соответствии с записанным выше обобщенным законом Гука в матричной форме представляет собой компоненту ε_3 и определяется формулой:

$$\varepsilon_{z_1} = \varepsilon_3 = S'_{13} \sigma_1 + S'_{23} \sigma_2 + S'_{34} \sigma_4 + S'_{35} \sigma_5 + S'_{36} \sigma_6 + \alpha_{z_1} T(x_1, y_1),$$

и в цилиндрической системе координат $\{r, \theta, z_1\}$ имеет вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{z_1} = \text{const} &+ \frac{\Delta T r^2}{r_0^2} \{A(\rho)(S'_{13} + S'_{23}) + B(\rho)S'_{34} + C(\rho)S'_{35} + \\ &+ 2[A(\rho)S'_{13} + C(\rho)S'_{35}]\sin^2 \theta + 2[A(\rho)S'_{23} + B(\rho)S'_{34}]\cos^2 \theta - \\ &- 2[C(\rho)S'_{34} + B(\rho)S'_{35} + A(\rho)S'_{36}]\sin \theta \cos \theta - \alpha'_{z_1}\}. \end{aligned}$$

Для расчетов используются матрицы коэффициентов теплового расширения α и упругой податливости $S = C^{-1}$ (определенные по матрице упругой жесткости C [3; 4]), приведенные в кристаллографической системе координат (поскольку данные для коэффициентов матрицы C в [3] и [4] несколько различаются, то используются их средние значения):

$$\alpha = \begin{pmatrix} 3,1 & 0 & 4,28 \\ 0 & 7,38 & 0 \\ 4,28 & 0 & 9,5 \end{pmatrix} [10^{-6} \text{ K}^{-1}].$$

$$S = \begin{pmatrix} 5,94 & -1,89 & -2,14 & 0 & -1,47 & 0 \\ -1,89 & 5,87 & -0,52 & 0 & 0,89 & 0 \\ -2,14 & -0,52 & 7,19 & 0 & 1,57 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 19,5 & 0 & -2,96 \\ -1,47 & 0,89 & 1,57 & 0 & 17,9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2,96 & 0 & 15,6 \end{pmatrix} [10^{-12} \text{ Па}^{-1}].$$

Преобразование матриц α и S в рабочую систему координат $\{x_1, y_1, z_1\}$ осуществляется с помощью матричного произведения: $\alpha' = U\alpha U^T$ и $S' = QSQ^T$, индекс « T » означает транспонированную матрицу. U – матрица «направляющих косинусов» для перехода от системы координат $\{x, y, z\}$ к системе координат $\{x_1, y_1, z_1\}$ (рисунок 1):

$$U = \begin{pmatrix} \cos(\rho + 11,35^\circ) & 0 & -\sin(\rho + 11,35^\circ) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\rho + 11,35^\circ) & 0 & \cos(\rho + 11,35^\circ) \end{pmatrix}$$

для ρ_{gm} -вырезки,

$$U = \begin{pmatrix} -\sin \rho \cos 11,35^\circ & \cos \rho & \sin \rho \sin 11,35^\circ \\ \sin 11,35^\circ & 0 & \cos 11,35^\circ \\ \cos \rho \cos 11,35^\circ & \sin \rho & -\cos \rho \sin 11,35^\circ \end{pmatrix}$$

для ρ_{mp} -вырезки,

$$U = \begin{pmatrix} \cos \rho \sin 11,35^\circ & -\sin \rho & \cos \rho \cos 11,35^\circ \\ \cos 11,35^\circ & 0 & -\sin 11,35^\circ \\ \sin \rho \sin 11,35^\circ & \cos \rho & \sin \rho \cos 11,35^\circ \end{pmatrix}$$

для ρ_{pg} -вырезки.

Q – матрица трансформации [размером (6×6)], ее коэффициенты определяются соответствующими комбинациями коэффициентов матрицы U , выражения для которых представлены в [5]. Использовались литературные данные по показателям преломления и их температурным коэффициентам кристалла YSO: $n_p = 1,7905$, $n_m = 1,7935$, $n_g = 1,8148$, $dn_p/dT = 9,05 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $dn_m/dT = 5,70 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $dn_g/dT = 6,73 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Компонента деформаций ε_{z_1} зависит от угла θ , то «обобщенный» термо-оптический коэффициент Δ также является θ -зависимым. Вследствие этого оптическая сила ТЛ для световых лучей, распространяющихся в разных меридиональных плоскостях (определяемых направлением распространения света k и некоторой ортогональной ему плоскостью), будет различной, то есть ТЛ будет астигматической. Существуют две взаимно ортогональные меридиональные плоскости (главные), для которых оптическая сила ТЛ максимальна (плоскость А) и минимальна (плоскость В). Поскольку оптическая сила ТЛ D пропорциональна коэффициенту Δ , то количественно астигматизм ТЛ будем описывать степенью астигматизма $S_\Delta = (\Delta_A - \Delta_B)$, то есть разностью между коэффициентами Δ для меридиональных плоскостей А (Δ_A) и В (Δ_B).

На рисунок 3 приведены «обобщенные» термо-оптические коэффициенты Δ_A и Δ_B для

главных меридиональных плоскостей ТЛ и степень астигматизма S_{Δ} ТЛ для различных вырезов кристалла YSO, определяемых углом ρ .

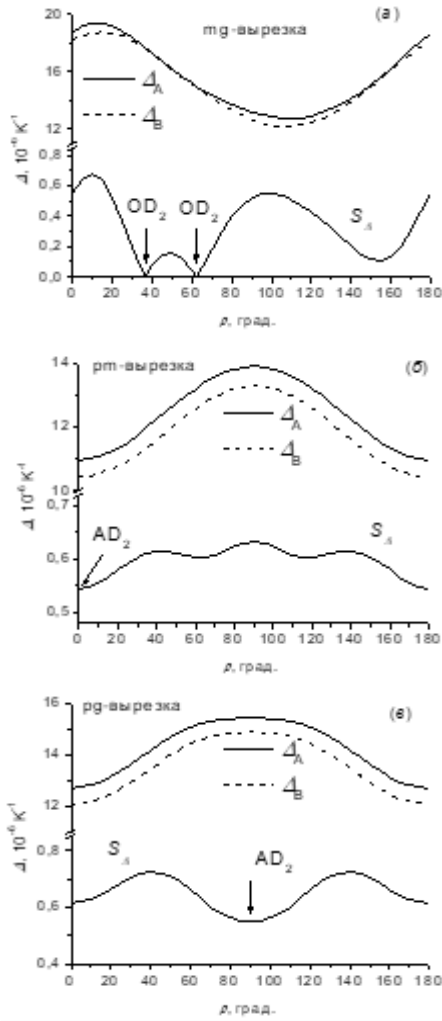


Рисунок 3 – «Обобщенные» термооптические коэффициенты Δ_A и Δ_B для главных меридиональных плоскостей ТЛ и степень астигматизма $S_{\Delta} = (\Delta_A - \Delta_B)$ ТЛ для (а) ρ_{tg} -, (б) ρ_{pm} - и (в) ρ_{pg} -вырезов кристалла YSO

Строгое определение атермальности направления распространения света требует выполнения условия $\Delta_A = \Delta_B = 0$, которое практически невозможно реализовать. Поэтому для лазерных активных элементов под атермальным направлением (AD) понимается такая его ориентация, при которой ТЛ является слабой, положительной и близкую к сферической, то есть, когда $\Delta_A, \Delta_B > 0$; $\Delta_A, \Delta_B \rightarrow 0$ и $S_{\Delta} \rightarrow 0$. Для некоторых лазерных наиболее критичным является выполнения условия положительной ТЛ и низкого его астигматизма, поэтому можно рассматривать два типа AD: когда выполняются все указанные выше условия (тип

AD₁), и когда выполняются условия $\Delta_A, \Delta_B > 0$ и $S_{\Delta} \rightarrow 0$ (тип AD₂).

Атермальных направлений AD₁ в кристалле YSO не существуют, поскольку для него коэффициент dn/dT положительный для всех поляризаций света и не может компенсировать положительный вклад в ТЛ эффекта продольной деформации активного элемента. Степень астигматизма S_{Δ} для всех ρ -вырезов кристалла изменяется немонотонно с ростом угла ρ (рисунок 3), что обусловлено анизотропией упругих констант и теплового расширения. Для ρ_{pg} -вырезки степень астигматизма минимальна для угла $\rho = 90^\circ$, то есть для N_g -вырезки, а коэффициенты Δ_A и Δ_B положительны, что соответствует атермальному направлению AD₂ (рисунок 3, в). Степень астигматизма наименьшая для ρ_{pm} -вырезки при угле $\rho = 0^\circ$ (и 180°) (то есть для N_m -вырезки) при $\Delta_A, \Delta_B > 0$, что можно отнести к атермальному направлению AD₂ (рисунок 3, б). В случае ρ_{mg} -вырезки при положительных коэффициентах Δ_A и Δ_B степень астигматизма для углов $\rho = 36,6^\circ$ и $62,0^\circ$ равна нулю, и эти направления можно считать атермальными типа AD₂ (рисунок 3, а). Следует отметить, что вклад в оптическую силу ТЛ эффекта продольной деформации активного элемента сравним по величине со вкладом эффекта зависимости показателя преломления материала активного элемента от температуры.

Таким образом, угловая зависимость для кристалла YSO коэффициента Δ_{EB} , представляющего собой вклад в оптическую силу ТЛ эффекта продольной деформации активного элемента, приводит к тому, что данный эффект вносит свой вклад в астигматизм ТЛ. Причиной этого является анизотропия термической деформации активного элемента в направлении распространения в нем света.

Литература

1. Efficient laser action of Yb:LSO and Yb:YSO ox-yorthosilicates crystals under high-power diode-pumping / M. Jacquemet [et al.] // Appl. Phys. B. – 2005. – Vol. 80. – P. 171–176.
2. Sirotin, Y.I. Temperature stresses, emergent during heating and cooling of single crystals / Y.I. Sirotin // Crystallogr. Rep. – 1956. – Vol. 1. – P. 708–717.
3. Theoretical Predictions on Elastic Stiffness and Intrinsic Thermal Conductivities of Yttrium Silicates / Y. Luo [et al.] // J. Am. Ceram. Soc. – 2014. – Vol. 97 (3). – P. 945–951.
4. First-principle investigation of doping effects on mechanical and thermodynamic properties of Y₂SiO₅ / A. Mirzai [et al.]. – 2013. – Vol. 154. – P. 103739–1–103739–10.
5. Yumashev, K. Thermal stress and end-bulging in monoclinic crystals: The case study of double tungstates / K. Yumashev, P. Loiko // Appl. Opt. – 2017. – Vol. 56, № 13. – P. 3857–3866.

УДК 535.37;620.3

КИНЕТИКА ЗАТУХАНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ ИТТРИЙ (ЛЮТЕЦИЙ)-АЛЮМИНИЕВОГО ГРАНАТОВ И АЛЮМИНАТА ГАДОЛИНИЯ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ ЕВРОПИЯ

Юмашев К.В.¹, Хорт А.А.², Подболотов К.Б.³, Шиманский В.И.⁴

¹*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

²*Королевский технологический институт
Стокгольм, Швеция*

³*Физико-технический институт НАНБ*

⁴*Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Исследована кинетика затухания люминесценции наноструктурированных порошков иттрий-алюминиевого и лютеций-алюминиевого гранатов и алюмината гадолиния, активированных ионами европия, синтезированных методом экзотермического горения в растворах. Для исследуемых материалов определены времена затухания люминесценции, определяемое временем жизни в состоянии 5D_0 ионов европия.

Ключевые слова: наноструктурированные порошки, люминесценция, время жизни.

LUMINESCENCE DECAY KINETICS OF NANOSTRUCTURED POWDERS OF YTTRIUM (LUTETIUM)-ALUMINUM GARNETS AND GADOLINIUM ALUMINATE DOPED WITH EUROPIUM IONS

Yumashev K.V.¹, Khort A.A.², Podbolotov K.B.³, Shimanski V.I.⁴

¹*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

²*KTH Royal Institute of Technology
Stockholm, Sweden*

³*Physical Technical Institute of NASB*

⁴*Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Luminescence decay kinetics of europium-doped nanostructured powders of yttrium-aluminum garnet, lutetium-aluminum garnet, and gadolinium aluminate synthesized by the solution combustion technique have been studied. For the materials under study, the luminescence decay times determined by the lifetime in the 5D_0 state of europium ions were determined.

Key words: nanostructured powders, luminescence, lifetime.

*Адрес для переписки: Юмашев К.В., проспект Независимости, 65/17, Минск, 220113, Беларусь
e-mail: kyumashev@bntu.by*

В настоящей данной работе исследуется кинетика затухания люминесценции наноструктурированных порошков иттрий-алюминиевого и лютеций-алюминиевого гранатов и алюмината гадолиния, активированных ионами европия, синтезированных методом экзотермического горения в растворах. Сочетание хороших механических и теплофизических свойств данных материалов с отличительными особенностями люминесцентных свойств иона европия делает их перспективными средами для применения в качестве люминофоров с люминесценцией в красной области спектра, в детектировании искажения кристаллической структуры материала, в термографической люминофорной термометрии. Достоинством метода экзотермического горения в растворах, с помощью которого синтезированы исследуемые в данной работе материалы, является сочетание простота и низкой стоимости с высоким структурным совершенством и однородно-

стью синтезированных материалов [1]. Для исследуемых материалов ранее были исследованы спектры люминесценции и определены для них координаты цвета, которые находятся в оранжевой области спектра [2].

Из синтезированных порошков 10 ат. % $\text{Eu}^{3+}:\text{GdAlO}_3$ (орторомбическая сингония, пространственная группа точечной симметрии P_{bnm}) и 20 ат. % $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, 11 ат. % $\text{Eu}^{3+}:\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (кубическая сингония, пространственная группа точечной симметрии $Ia\bar{3}d$) после их соответствующей термообработки (прикалывания) приготавливались образцы в виде таблеток. Для образцов 10 ат. % $\text{Eu}:\text{GdAlO}_3$ средний радиус нанокристаллов составлял ~24 нм, а для 20 ат. % $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ и 11 ат. % $\text{Eu}^{3+}:\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ – ~20 нм.

Возбуждение люминесценции осуществлялось на длине волны 0,355 мкм импульсами излучения третьей гармоники лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом с длительностью

20 нс. Люминесценция регистрировалась на длине волны 0,605 мкм, соответствующей переходу ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ иона европия Eu^{3+} .

На рисунке 1 представлены кинетики затухания люминесценции для исходного (синтезированного) и прокаленных при температурах 800 °C и 1300 °C образцов 10 ат.% $\text{Eu}:\text{GdAlO}_3$.

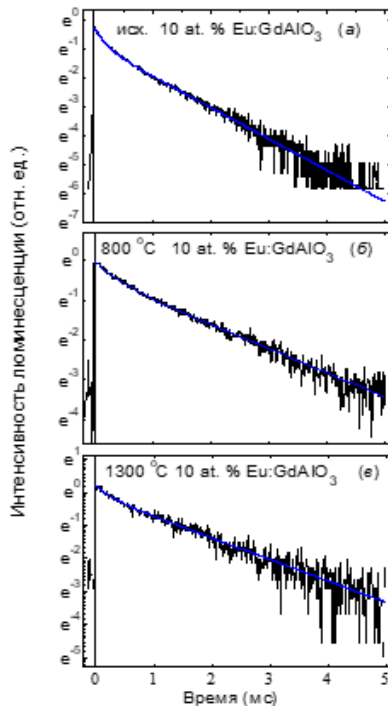


Рисунок 1 – Кинетики затухания люминесценции исходного (а) и прокаленных при температурах 800 °C (б) и 1300 °C (в) образцов 10 ат. % $\text{Eu}:\text{GdAlO}$.

Сплошные линии – аппроксимация экспериментальных данных двухэкспоненциальной функцией с помощью метода наименьших квадратов. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,9980$ (а); 0,9914 (б); 0,9815 (в)

Для всех образцов кинетика затухания 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. Для исходного образца времена быстрой и медленной компонент затухания составляют $\tau_1 = 0,2$ мс и $\tau_2 = 0,9$ мс. Для термообработанных образцов времена затухания τ_1 и τ_2 одинаковы и равны $\tau_1 = 0,3$ нс и $\tau_2 = 1,6$ мс. При этом относительный вклад быстрой компоненты затухания в общий общую интенсивность люминесценции $[\int I_1(t)dt / \int I(t)dt]$ уменьшается при термообработке и составляет 14,9, 9,5 и 6,5 % соответственно для исходного и прокаленных при температурах 800 °C и 1300 °C образцов.

Быструю компоненту τ_1 затухания можно отнести к ионам европия, находящимся в аморфной фазе и дефектах кристаллической решетки, а медленную компоненту τ_2 затухания отнести к ионам европия в нанокристаллах GdAlO_3 . Термообработка

приводит к уменьшению доли аморфной фазы в образце, а также к снижению дефектности нанокристаллической фазы и, следовательно, к ослаблению безызлучательной релаксации, что проявляется в уменьшении вклада быстрой компоненты затухания (величины A_1) и возрастании времени τ_2 .

На рисунке 2 приведены кинетики затухания люминесценции для исходного и прокаленных при температурах 800 °C и 1300 °C образцов 20 ат. % $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ и 11 ат.% $\text{Eu}^{3+}:\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$.

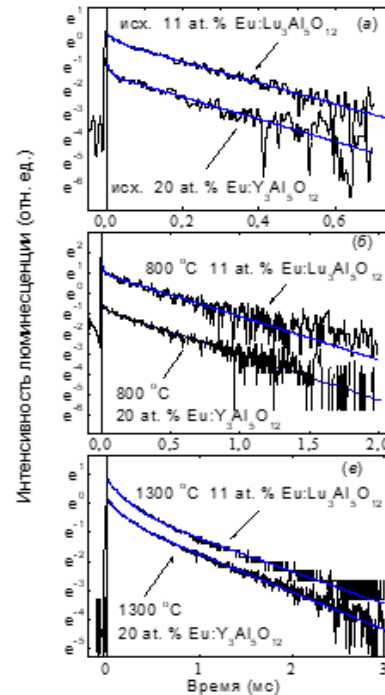


Рисунок 2 – Кинетика затухания люминесценции исходного (а) и прокаленных при температурах 800 °C (б) и 1300 °C (в) образцов 20 ат. % $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ и 11 ат. % $\text{Eu}^{3+}:\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$. Сплошные линии – аппроксимация экспериментальных данных двухэкспоненциальной функцией с помощью метода наименьших квадратов.

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,9769$ и 0,9427 (а); 0,9333 и 0,9741 (б); 0,9745 и 0,9970 (в)

Для образцов 20 ат. % $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ и 11 ат. % $\text{Eu}^{3+}:\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, также, как и для 10 ат. % $\text{Eu}:\text{GdAlO}$, кинетика затухания люминесценции не является одноэкспоненциальной и может быть представлена в виде суммы двух экспонент – быстрой и медленной с постоянными времени τ_1 и τ_2 . Для исходного образца $\tau_1 = 0,01$ мс ($\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$), 0,02 мс ($\text{Eu}^{3+}:\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) и $\tau_2 = 0,2$ мс для обоих образцов. Быструю компоненту τ_1 затухания можно связать с ионам европия в аморфной фазе и дефектах кристаллической решетки, а медленную компоненту τ_2 – с ионам европия в нанокристаллах. Термообработка приводит к увеличению времен затухания. При прокаливании при 800 °C времена $\tau_1 = 0,04$ мс ($\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$), 0,14 мс ($\text{Eu}^{3+}:\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) и $\tau_2 = 0,5$ мс для обоих образцов. После прокаливании при

1300 °C: $\tau_1 = 0,14$ мс, $\tau_2 = 0,8$ мс ($\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) и $\tau_1 = 0,18$ мс, $\tau_2 = 0,9$ мс ($\text{Eu}^{3+}:\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$). Относительный вклад быстрой компоненты затухания $[I_1(t)dt/I(t)dt]$ после термообработки увеличивается с 3,0 % до 12,5 % (1300 °C) для $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ и с 3,2 % до 23,1 % (1300 °C) для $\text{Eu}^{3+}:\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$. Наблюдаемое увеличение при прокаливании образцов времени затухания люминесценции и относительного ее вклада для быстрой компоненты увеличивает немонотонный характер затухания и, вероятнее всего, связано с конкуренцией эффектов уменьшения доли аморфной фазы в образце и снижения дефектности нанокристаллической фазы с эффектом концентрационного тушения люминесценции.

Если затухание люминесценции не является монотонным, то в некоторых случаях интерес представляет ее средняя длительность. Исходя из математического определения среднего значения функции, средняя длительность

люминесценции можно определить по формуле $\tau_{\text{cp}} = \int tI(t)dt / \int I(t)dt$. Следует отметить, что в случае монотонного затухания значение τ_{cp} будет равно ее постоянной времени затухания. Для образца 10 ат. % $\text{Eu}:\text{GdAlO}$ τ_{cp} составляет 0,8 мс для исходного и 1,3 мс для термообработанных образцов. Для образцов $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ и $\text{Eu}^{3+}:\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ τ_{cp} одинаково и составляет 0,2 мс для исходного и 0,4 мс и 0,65 мс для прокаленных при температуре 800 °C и 1300 °C соответственно.

Литература

1. Chemistry – A European Journal / E. Carlos [et. al.]. – 2020 – Vol. 26 – P. 9099–9125.
2. Спектрально-люминесцентные свойства нанокристаллов иттрий(лютеций)-алюминиевого гранатов и алюмината гадолиния, активированных ионами европия / Юмашев К.В. [и др.] // Материалы 15-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2022, 16–18 ноября 2022 г., Минск, Республика Беларусь. – БНТУ, Минск. – С. 419–421.

УДК 535 012.2 621.373.826.038.82

ХАОТИЧЕСКИЕ И СТОХАСТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ГЕНЕРАЦИИ В ЛАЗЕРАХ С АНИЗОТРОПНЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ

Свирина Л.П.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. На основании экспериментально апробированных моделей проанализированы сценарии возникновения детерминированного хаоса, а также причины появления индуцированных шумом сложных хаотических и стохастических колебаний в лазерах класса А и класса В с анизотропными резонаторами при наличии линейной связи волн генерации. Установлено, что для сложной динамики в анизотропных лазерах с различными активными средами характерны следующие общие свойства: наличие асимметричного хаоса, локализованного в цилиндрическом фазовом пространстве и, вследствие инволютивной симметрии моделей, бистабильности таких аттракторов, а также индуцированных шумом стохастических колебаний, возникающих при рождении периодического режима вблизи порога генерации.

Ключевые слова: анизотропные лазеры с линейной связью, хаотические и стохастические колебания.

CHAOTIC AND STOCHASTIC OSCILLATIONS IN ANISOTROPIC-CAVITY LASERS

Svirina L.P.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. On the basis of the experimentally tested models the routes to deterministic chaos and the reasons for the appearance of the noise-induced complicated chaotic and stochastic oscillations in anisotropic-cavity class A and class B lasers with linear coupling of the emitted waves have been elucidated. It has been shown that complicated dynamics of anisotropic-cavity lasers with different active media manifests the followings common features: localized in cylindrical phase space asymmetric chaos, and due to the involutive symmetry of the models, the bistability of such attractors, as well as noise-induced stochastic oscillations, arising when the Hopf bifurcation line comes closely to the lasing threshold.

Key words: anisotropic-cavity lasers with linear coupling, deterministic and noise-induced chaos.

*Адрес для переписки: Свирина Л.П., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: lpsvirina@bntu.by*

Проведено обобщение полученных результатов с целью создания представлений о механизмах формирования сложных (хаотических и стохастических) режимов генерации в анизотропных лазерах класса А и класса В с линейной связью генерируемых волн.

Динамика генерации одномодового четырех-частотного кольцевого газового лазера (ЧКГЛ) подробно изучена в работе [1], где показано, что учет эллиптичности в условиях многомодовой генерации в зависимости от коэффициента линейной связи r приводит к возникновению сложных

колебаний различной природы. Так, детерминированный хаос, рождающийся через последовательность бифуркаций удвоения периода асимметричного предельного цикла первого рода (аттрактор Фейгенбаума), возникает при изменении отстройки частоты генерации x .

Рисунок 1 иллюстрирует эволюцию временных реализаций интенсивностей встречных волн I_1^\pm (левая колонка) и спектров мощности (правая колонка): предельный цикл с периодом T (а), $2T$ (б), $4T$ (в), хаос (г). В силу инволютивной симметрии уравнений генерации имеет место бистабильность всех асимметричных режимов. В области существования аттрактора Фейгенбаума возможны режимы генерации, возникающие при попадании фазовой траектории в область притяжения обоих асимметричных аттракторов (рисунок 2).

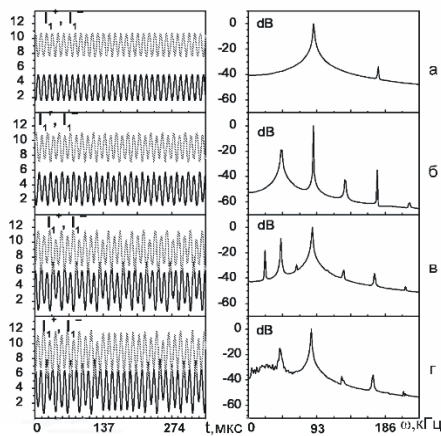


Рисунок 1 – Рождение аттрактора Фейгенбаума

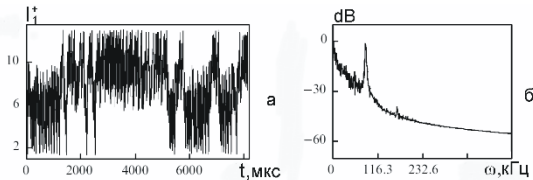


Рисунок 2 – Хаос, возникающий при взаимодействии двух асимметричных аттрактора Фейгенбаума

При уменьшении коэффициента связи r в ЧКГЛ возникают режимы генерации, чувствительные к воздействию случайных флуктуаций. Вначале рождается асимметричный предельный цикл II рода с колебаниями интенсивностей $I_{1,2}^\pm$ и вращением разностей фаз $\Psi_{1,2}$ встречных волн, причем интенсивность одной из волн (I_2^-) колеблется вблизи порога генерации. Рисунок 3 иллюстрирует эволюцию режимов генерации в присутствии δ -коррелированного белого шума с амплитудой $D = 10^{-7}$ при увеличении отстройки x при $r = 0,00001$. Здесь приведены временные реализации (левая колонка) для интенсивностей волн I_2^\pm , а также спектры мощности для волны I_2^-

(средняя колонка) и для волны I_2^+ (правая колонка). Как видно из рисунка, вначале, при $x = -45,84$ МГц фиксируется асимметричный предельный цикл, и влиянию шума подвержена только переменная $I_2^-(a)$. При $x = -47,04$ МГц I_2^- полностью управляется шумом, и режим генерации становится стохастическим (б). При $x = -47,42$ МГц (в) вследствие нелинейного взаимодействия интенсивность волны I_2^- увеличивается, так что она становится нечувствительной к шуму, но при этом, как видно из рисунка (в), сложные колебания претерпевают все переменные, что соответствует асимметричному хаосу. И, наконец, при $x = -48,47$ МГц (г) фиксируется долгопериодический асимметричный предельный цикл со сложной формой колебаний. Все аттракторы (а)–(г) локализованы в цилиндрическом фазовом пространстве и из-за симметрии модели имеет место бистабильность (рисунок 4).

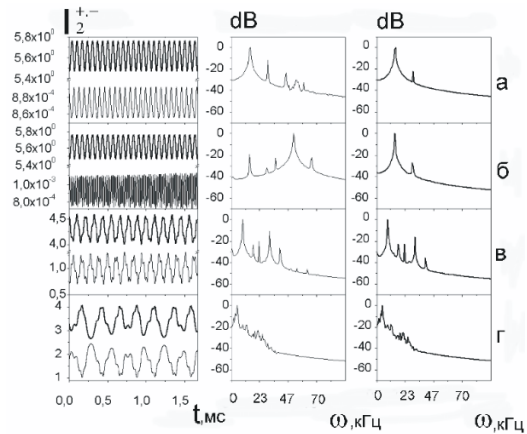


Рисунок 3 – Эволюция режимов генерации в присутствии случайных флуктуаций

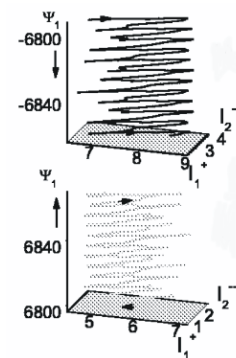


Рисунок 4 – Бистабильность асимметричных долгопериодических колебаний, локализованных в цилиндрическом фазовом пространстве

При дальнейшем увеличении x рождается симметричный предельный цикл, эволюционирующий в симметричный хаос типа перемежаемости. Динамика генерации одномодового линейного твердотельного Nd:Yag лазера (ТТЛ) с диодной

накачкой изучена в работе [2]. Теоретическая модель данного лазера ограничена реализацией одночастотного режима генерации волны с произвольным состоянием поляризации и двухчастотного режима генерации волн с линейными ортогональными состояниями поляризации, интенсивности которых I_x , I_y и разность фаз Ψ . Сложные колебания в данном ТТЛ возникают в режиме двухчастотной генерации. Так, асимметричный хаос типа перемежаемости, обнаружен при изменении линейной фазовой анизотропии резонатора $\Delta\omega$. В силу симметрии модели имеет место бистабильность асимметричных аттракторов (рисунок 6).

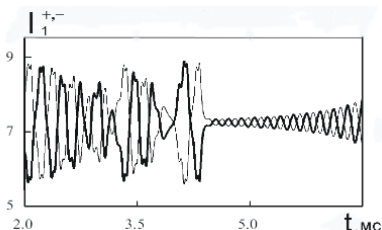


Рисунок 5 – симметричный хаос типа перемежаемости при $x = -51,4$ МГц

Влияние случайных флуктуаций обнаружено в припороговой области генерации. На рисунке 7 показаны фазовые проекции предельных циклов в отсутствие (а) и при наличии (б) случайных флуктуаций.

УДК 535.37: 537.533.35; 537.534.35

РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО МИКРОСКОПА Жук Ю.А.^{1,2}, Фёдоров Р.В.², Леванович А.М.¹, Масловский В.А.²

¹ООО «Регула»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены возможности расширения функциональных возможностей спектрально-люминесцентного микроскопа для исследования различных объектов и их свойств. Представлен способ автоматизации процесса работы микроскопа посредством применения специализированного программного обеспечения для считывания и обработки изображения.

Ключевые слова: микроскоп, люминесценция, осветитель, цифровое изображение.

EXPANDING THE FUNCTIONAL CAPABILITIES OF A SPECTRAL-LUMINESCENCE MICROSCOPE

Zhuk Y., Feodortsau R., Levanovich A., Maslouski U.

¹LTC "Regula"

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The possibilities of expanding the functionality of a spectral-luminescence microscope for studying various objects and their properties are considered. A method for automating the microscope operation process through the use of specialized software for image reading and processing is presented.

Keywords: microscope, luminescence, illuminator, digital image.

Адрес для переписки: Жук Ю.А., ул. Налибокская 10, г. Минск, 220055, Республика Беларусь
e-mail: uakuav@gmail.com

В основу работы спектрально-люминесцентных микроскопов заложено оптическое свойство согласно которому при облучении различных объектов ультрафиолетовым светом они

начинают светиться в видимом диапазоне спектра. Флуоресценция характерна для витаминов, кристаллов, горных пород, масел и хлорофилла и пр. Применение флуоресценции позволило

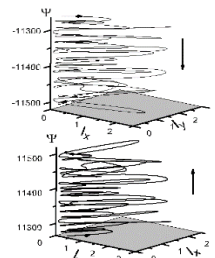


Рисунок 6 – бистабильность асимметричных хаотических аттракторов типа перемежаемости, локализованных в цилиндрическом фазовом пространстве

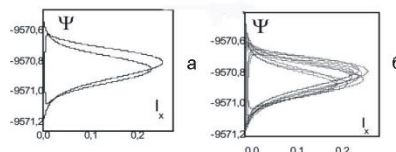


Рисунок 7 – фазовые проекции в отсутствие (а) и при наличии (б) δ -коррелированного белого шума

Литература

1. Свирина, Л.П. Фазовая неустойчивость в четырехчастотном кольцевом газовом лазере с анизотропным резонатором / Л.П. Свирина // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38, № 1. – С. 1–15.
2. Свирина, Л.П. Фазовая неустойчивость в одномодовом твердотельном лазере с анизотропным резонатором. / Л.П. Свирина // Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т. 107, № 2. – С. 207–212.

изучать микрообъекты с разрешением от 1 до 10 нм. Наноскопия может раскладывать частицы на отдельные молекулы. При физическом процессе соединения поглощают фотоны. Одновременно у веществ появляется излучение с иной длиной волны. У получившихся фотонов она больше, но энергии при этом – меньше. Люминесцентные устройства функционируют в отраженном свете. Основной задачей при применении флуоресценции является отделение потока света объекта от сильного излучения подсветки. Чтобы увеличить наглядность изображения, используется темный или черный фон [1].

Компания ООО «Регула» выпускает Микроскоп спектральный люминесцентный «Регула» 5001МК (рисунок 1), предназначенный для проведения Экспертных исследований паспортов, идентификационных карт и прочих документов, удостоверяющих личность и дающих право на пересечение границы; визовых марок и отисков печати, в том числе для разрешения на въезд; водительских удостоверений, сертификатов на транспортные средства, иных документов, связанных с автотранспортом; банкнот; акцизных и специальных марок; ценных бумаг и иных документов со средствами защиты от подделки [2].

Стационарная модель микроскопа включает металлический корпус. Управление источниками света и видеокамерой для различных режимов исследования осуществляется с лицевой панели прибора либо через интерфейс программного обеспечения «Regula Forensic Studio». Микроскоп оборудован ЖК-дисплеем, на котором отображаются режимы исследования. Обладает набором источников излучения видимого, инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов спектра для проведения криминалистических экспертиз, комплектом светофильтров. Позволяет получать, редактировать и сохранять цифровые изображения исследуемых объектов, осуществлять визуальный контроль с помощью бинокулярной насадки.



Рисунок 1 – Микроскоп спектрально-люминесцентный 5001МК

Микроскоп обеспечивает следующие возможности:

- наблюдение на экране монитора увеличенного изображения исследуемых объектов;
- дополнительный визуальный контроль при помощи бинокулярной насадки;
- пофрагментные наблюдения исследуемых объектов;

– дальнейшую обработку изображения на компьютере с помощью специализированного программного обеспечения *Regula Forensic Studio* (далее программы RFS или ПО RFS) с последующим хранением изображения.

В микроскопе присутствует покупная бинокулярная насадка для визуального контроля за исследуемым объектом и покупное микрофотографическое устройство (далее – МФУ), которое в последствии было доработано для внедрения в микроскоп ПО RFS и управлением микроскопа с помощью интерфейса [3].

Итогом этой доработки стала возможность получения цифрового действительного изображения.

Цветная камера КМОП с количеством активных 3,1 Мп, обеспечивает размер кадра:

- 2048×1536 (Full Frame);
- 1920×1080 (Full HD);
- 1280×720 (HD).

Перечень доработок МФУ:

- установка ШД, датчиков и ограничителей;
- механизм смены увеличений;
- привод светофильтров.

Оптическая схема микроскопа представлена на рисунке 2.

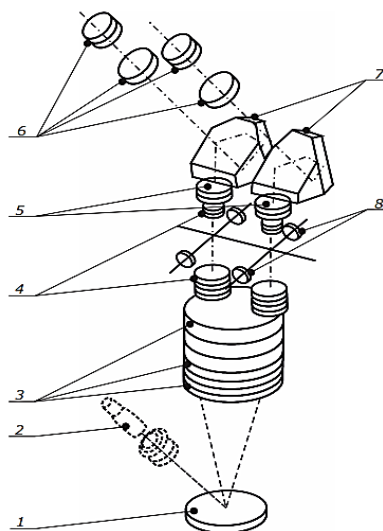


Рисунок 2 – Оптическая схема микроскопа спектрально-люминесцентного: 1 – стекло предметное, 2 – осветитель, 3 – объектив $f' = 90$ мм, 4 и 8 – система Галилея, 5 – объективов $f' = 90$ мм; 6 – окуляры 8× со шкалой и 14×, 7 – призма Шмидта

В микроскопе присутствуют следующие виды осветителей:

- белый верхний;
- УФ верхний (365 нм);
- синий верхний (455 нм);
- сине-голубой верхний (470 нм);
- сине-зеленый верхний (505 нм);
- зеленый верхний (530 нм);
- желто-оранжевый верхний (590 нм);
- красный верхний (627 нм);
- ИК верхний (870 нм и 940 нм);
- высокоинтенсивный ИК верхний (950 нм);

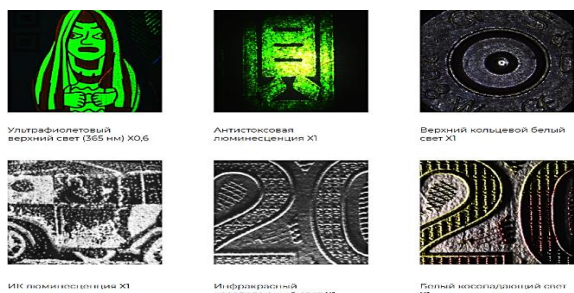


Рисунок 3 – Визуализация работы различных осветителей

- белый косопадающий, ИК косопадающий (870 нм);
- просветный (донный) белый;
- просветный (донный) ИК (870 нм);
- просветный (донный) УФ (365 нм);
- белый кольцевой;
- белый полукольцевой (2 режима);
- белый квадрант (4 режима);
- ИК кольцевой;
- ИК полукольцо (2 режима);
- ИК квадрант (4 режима) (870 нм).

В связи с тем, что прибор предназначен для проверки документов, получение цифрового изображения – неотъемлемая процедура, так как

при проверке действительно изображение нуждается в сверке с подлинным, которое в свое время хранится в базе данных.

Пример объектов исследований под разными видами осветителей представлен на рисунке 3.

Модель «Регула» 5001МК.01 комплектуется тисками криминалистическими для зажима объектов исследования: пуль, гильз и т. п.; их вращения в аксиальном, радиальном, тангенциальном направлении при снятой подвижной губе.

Ближайшими зарубежными аналогами рассматриваемой модели микроскопа являются: «МикМед-2» вариант 16; «Микмед 6» ЛОМО (Москва, РФ); «Альтами ЛЮМ 1» (С-Петербург, РФ); Evolution LUM LS-8530; SVX-M (ООО «ЕТГ»); «MSF-1» Carl Zeiss (Германия) и некоторые другие.

Литература

1. Как работает люминесцентная микроскопия. ООО «Биокоммерц» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://biocommerce.ru/spravochnik-po-tehnologiyam/kak-rabotaet-lyuminestsennaya-mikroskopiya/>.
2. Regula [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://regula.by/ru/products/advanced_verification/5001/.
3. Программный продукт управления жизненным циклом продукта (PLM) Windchill [Электронный ресурс]. – Режим доступа: windchill.regulaforensics.net.

УДК 681.777.078

ШИРОКОПОЛЬНЫЙ АВТОКОЛЛИМАТОР ДЛЯ ПРИЦЕЛЬНО-ВИЗИРНОГО УСТРОЙСТВА Масловский В.А.^{1,2}, Жук Ю.А.², Побожный А.А.^{1,2}, Фёдорцев Р.В.², Савельева Е.В.¹

¹ОАО «Пеленг»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе рассмотрены результаты модернизации конструкции цифрового автоколлиматора, используемого в качестве визирно-прицельного устройства. Произведена замена светоделиителя на блок призм включающую равнобедренную призму AP-90° и ромб-призму BS-0° с целью уменьшения вторичного переотражения лучей внутри оптической системы. Выбрана новая модель цифровой камеры (Basler ace 2 Basic) включающая фотоприемник с большей разрешающей способностью. В качестве осветителя выбран кластер светодиодов LUXEON Z, модель SZ-05-H5 и оптическая система фокусировки лучей, включающая двухлинзовый конденсор.

Ключевые слова: визирно-прицельное устройство, широкопольный, цифровой автоколлиматор.

WIDE-FIELD AUTOCOLLIMATOR FOR AIMING AND SIGHTING DEVICE Maslouski U.^{1,2}, Zhuk Y.², Pabozhny A.^{1,2}, Feodortsau R.², Savelyeva A.¹

¹JSC "Peleng"

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The work examines the results of modernizing the design of a digital autocollimator used as a sighting and sighting device. The beam splitter was replaced with a block of prisms including an isosceles prism AR-90° and a diamond prism BS-0° in order to reduce the secondary reflection of rays inside the optical system. Selected a new digital camera model (Basler ace 2 Basic) including a photodetector with higher resolution. LUXEON Z LEDs module of the model SZ-05-H5 were chosen as the illuminator. and an optical beam focusing system, including a two-lens condenser.

Keywords: sighting device, wide-field, digital autocollimator.

Адрес для переписки: Масловский В.А., Каховская, 39, Минск, 220268, Республика Беларусь
e-mail: night.clover@mail.ru

На сегодняшний день невозможно представить процесс юстировки оптического прибора без коллиматора. Коллиматор – универсальный

«инструмент», относящийся к приборам для контроля углов поля зрения телескопических систем, а также для контроля углов отклонения визирной

оси оптических приборов от нормали с высокой точностью. Более того, для повышения удобства эксплуатации, с новыми достижениями науки, на замену простым коллиматорам пришли автоколлиматоры, а за ними – стали использовать цифровые автоколлиматоры (ЦАК). Они, в свою очередь, не только делают юстировку действительно удобной и простой ввиду наблюдения не посредством визирного канала, а через монитор, подключенный к цифровой камере, но и позволяют в несколько раз увеличить точность юстировки.

В целом, фотоэлектрические автоколлиматоры по величине углового диапазона можно разделить на три группы, в которых проводятся измерения:

- узкопольные ($\alpha < 1^\circ$);
- среднопольные ($\alpha = 1 \pm 2^\circ$);
- широкопольные ($\alpha > 2^\circ$).

Последние используются для того, чтобы была возможность наблюдать не только область с меткой-тест-объектом, но и иметь возможность видеть всю картину в целом. Это применимо, если поверхность, на которую нужно сориентировать прибор находится на большом расстоянии, либо нам сложно ориентироваться по этой поверхности, например зеркало.

Рассмотрим узкопольный цифровой автоколлиматор, показанный на рисунке 1, с угловым полем $2\omega = 10'$, и его последующую модернизацию для использования в качестве широкопольного автоколлиматора для визирно-прицельного устройства, представленного на рисунке 2, с угловым полем $2\omega = 4^\circ 12'$.

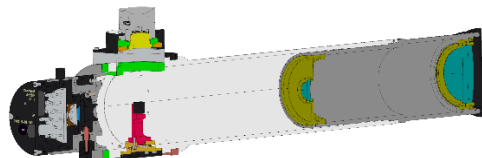


Рисунок 1 – Оптическая скамья

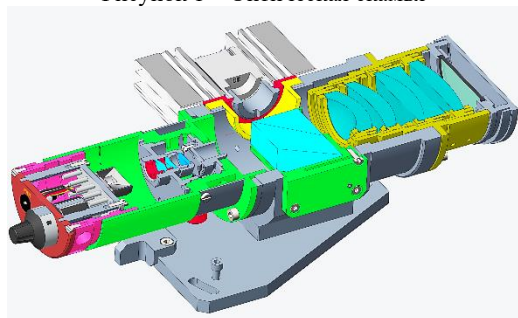


Рисунок 2 – Визирно-прицельное устройство

Прежде всего, стоит отметить, что изначальный автоколлиматор превосходит визирно-прицельное устройство по габаритам в несколько раз ввиду того, что используется в составе оптической скамьи, что означает, что главные изменения будут касаться размеров самого корпуса, крепления автоколлиматора, формы корпуса.

Второй группой изменений будет модернизация, изменение размеров и замена элементов оптической схемы.

Для лучшего понимания причины конструктивных изменений стоит начать как раз со второй группы. Ключевыми изменениями являются:

- замена цифровой камеры;
- модернизация светоделителя;
- добавление конденсора;
- замена кластера светодиодов.

Рассмотрим подробно каждое изменение и причины их возникновения.

В исходном прототипе прибора (разработан в 2019 году) использовалась камера Basler Pulse с разрешением 2 МП, размером пикселя $4,5 \times 4,5$ мкм, размерами сенсора $7,2 \times 5,4$ мм и общими габаритными размерами 27×38 мм. В последнее время на рынке появились камеры с разрешением на уровне 5–40 МП. Таким образом, камера модели Basler Ace 2 Basic, используемая в настоящее время, имеет разрешающую способность 8 МП, размер пикселя $2,74 \times 2,74$ мкм и размер сенсора $7,78 \times 7,78$ мм при общих габаритных размерах $28,5 \times 28,5 \times 48$ мм, что практически соизмеримо с размерами камеры прототипа. Однако, ввиду обеспечения стабильного температурного режима, для корректной работы камеры требуется установка радиатора, что делает габариты новой камеры в несколько раз больше (рисунок 3).

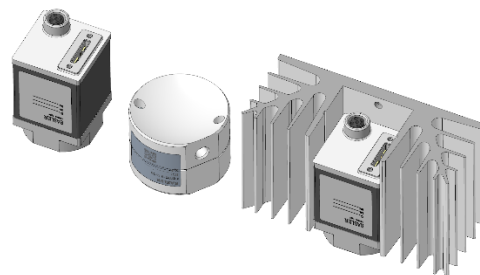


Рисунок 3 – Сравнение габаритов камер

В качестве светоделителя в прототипе используется куб-призма К-0°, поэтому в камеру, вместе с основным пучком, попадают блики от боковых граней вне зоны светового диаметра, а также от грани, находящейся с противоположной стороны от камеры, так как луч, который проходил через гипотенузную грань, разделялся надвое. Один луч попадал на матрицу цифровой камеры, а второй попадал на плоскую грань куба и, отражаясь, снова попадал в камеру, что создавало неудобства при наблюдении. Ввиду этого было решено изменить светоделитель на склейку из блока призм включающую равнобедренную призму АР-90° и ромб-призму БС-0° (рисунок 4). В результате изменяется ход лучей в противоположную от камеры сторону, на диагональной грани часть лучей преломляется и попадает в корпус, на стенки которого нанесено черное поглощающее глубокоматовое покрытие.

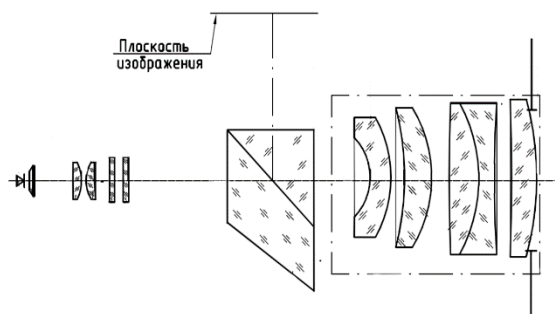


Рисунок 4 – Оптическая схема визирно-прицельного устройства

Кроме того, учитывая тот факт, что прицельно-визирное устройство будет работать с расстояниями куда большими нежели оптическая скамья, нам следует увеличить и интенсивность метки и наверняка избавиться от бликов, которые образуются после прохождения пучка лучей через оптические детали вне светового диаметра. Для этого был добавлен конденсор, который уменьшает пучок, приходящий от осветителя – кластера светодиодов LUXEON Z, модель SZ-05-H5, работающих на требуемой длине волны и линзы, которая преобразует свет этих четырех диодов так, чтобы у пучка был один максимум интенсивности вместо четырех, что показано на рисунке 5.

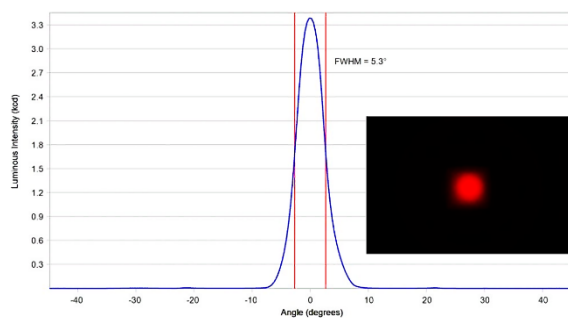


Рисунок 5 – График интенсивности светового потока после прохождения пучка через линзу осветителя

Вышеупомянутый кластер – тоже является замененным, если прототип работал на длине волны 620 нм, то прицельно-визирное устройство имеет рабочую длину волны 650–670 нм.

Перейдем к модернизации корпуса. Первое, что бросается в глаза – отсутствие длинной трубы. Также, раз был добавлен двухлинзовый конденсор, вместе с ним изменились конструкции втулок и оправок молочного стекла, вместе с которым соединен конденсор. Кроме того, в местах крепления оправы тест-объекта, ввиду изменения оправки для молочного стекла, больше нет доступа к винтам, поэтому было решено заменить винты с цилиндрической головкой и внутренним шестигранником на болты с шестигранной головкой и сделать соответствующие пазы во втулке, чтобы не было необходимости разбирать половину прибора при юстировке, а также, учитывая требуемую плавность закручивания этих болтов увеличить рычаг при закручивании.

В результате модернизации была получена модель компактного широкопольного автоколлиматора с минимальными габаритными размерами, с оптимальными выходными техническими параметрами, отличающаяся удобством в процессе сборки и юстировки.

Литература

1. Парвулюсов, Ю.Б. Проектирование оптико-электронных приборов: учебник / Ю.Б. Парвулюсов, С.А. Родионов, В.П. Солдатов; под ред. Ю. Г. Якушенкова. – М. : Логос, 2000. – 488 с.
2. Афанасьев, В.А. Оптические измерения: учебник для вузов / В.А. Афанасьев; под ред. Д.Т. Пуряева. – 3-е изд. – М. : Высшая школа, 1981. – 229 с.
3. Креопалова, Г.В. Оптические измерения / Г.В. Креопалова, Н.Л. Лазарева, Д.Т. Пуряев; под общ. ред. Д.Т. Пуряева. – М. : Машиностроение, 1987. – 264 с.
4. Королев, А.Н. Исследование точности позиционирования изображения на ПЗС матрице / А.Н. Королев, А.И. Гарцуев // Измерительная техника. – 2004. – № 5. – С. 20–22.

УДК 535.317; 681.7

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕПЛОВИЗИОННОГО МОДУЛЯ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТИВА

Артиухина Н.К., Бурдо М., Побожный А.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлен анализ базовой схемы и результаты расчета оценки качества в геометрическом и волновом представлении.

Ключевые слова: объектив, коррекция аберраций, качество изображения.

MODERNIZATION OF THE THERMAL IMAGING MODULE DUE TO OPTIMIZATION LENS PARAMETERS

Artioukhina N.K., Burdo M., Pobozhny A.A.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The analysis of the basic scheme and the results of the calculation of the quality assessment in geometric and wave representation are presented.

Key words: Lens, aberration correction, image quality.

Адрес для переписки: Бурдо М., ул. Я. Коласа, 22 – 604, а, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
e-mail: art49@mail.ru

С каждым годом номенклатура выпускаемых оптических приборов расширяется, создаются новые конструкции, непрерывно совершенствуются серийные образцы. В современном приборе используют последние достижения науки и техники по механике, оптике и электронике. Тепловизионные модули расширяют область применения приборов в различных областях спектра; использование ПЗС-матриц дают дополнительные преимущества.

Специальные задачи, например, наблюдение за объектом, находящимся в сложных условиях (температура и пр.) требуют специально рассчитанной оптики. В то время, как серийно выпускаемые объективы не всегда подходят для конкретных задач ввиду их избыточной сложности и, следовательно, высокой стоимости, а также недостаточным качеством изображения для узко специализированной задачи. Поэтому компаниям, выпускающим оптико-электронные приборы, приходится самостоятельно рассчитывать объективы для своих изделий.

Работа тепловизионного монокуляра построена на принципе регистрации теплового излучения в инфракрасном спектре от объектов и его преобразовании в двухмерное изображение в видимом спектре.

К оптическим элементам тепловизионных модулей можно отнести следующие. Объектив тепловизора формирует на сенсоре температурную карту (или карту разности мощности излучения) всей наблюдаемой в поле зрения области. Микропроцессор и другие электронные компоненты конструкции считывают данные с матрицы, обрабатывают их и формируют на дисплее прибора

изображение, являющееся визуальной интерпретацией этих данных, которое напрямую или через окуляр рассматривает наблюдатель.

Объектив – оптическая система, формирующая действительное изображение объекта наблюдения на светочувствительной площадке приемника. Обычно объектив состоит из набора линз, рассчитанных для взаимной компенсации аберраций. Обычно объективы изготавливаются из различных материалов, самым распространенными из которых являются монокристаллический германий и халькогенидные стекла.

Цель работы – проектирование, расчет и оптимизация объектива с заданным углом поля зрения и контрастом изображения для модернизации тепловизионного модуля. Объектив должен обеспечивать контраст изображения на частоте Найквиста не менее 0,4.

Таблица. Технические характеристики объектива

Параметры	Численное значение
Увеличение	1,1 ^x
Фокусное расстояние	29 мм
Относительное отверстие	1:1
Угловое поле	$2\omega = 15^\circ \times 12^\circ$
Спектральный диапазон	от 8 до 12 мкм

Проектирование и синтез схемы объектива проводился по предложенному алгоритму с использованием проработанных пакетов (ПП) Опал и Земакс. На первом этапе осуществлялся поиск базовой схемы.

На рисунке 1 представлена оптическая схема базового ИК объектива тепловизора: фокусное расстояние объектива 40 мм, который рассчитан для спектральной длины волны 10 мкм.

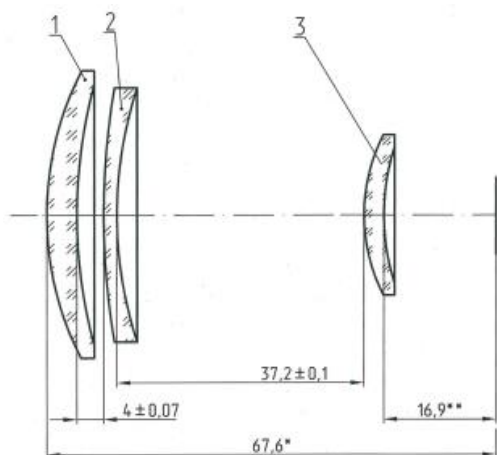


Рисунок 1 – Базовая схема

Проведены абберационные расчеты объектива $f' = 40$ мм и объектива $f' = 29$ мм. Цель расчета: определение изменения по качеству изображения, опираясь на абберации. Оценка проведена по четырем параметрам: MTF поля, точка рассеяния, кривизна поля и дисторсия.

Расчеты проведены в ПП Земакс: рассчитаны характеристики и абберации исследуемой системы. С помощью инструмента Lens Data Editor заданы радиусы, толщины и марки линз.

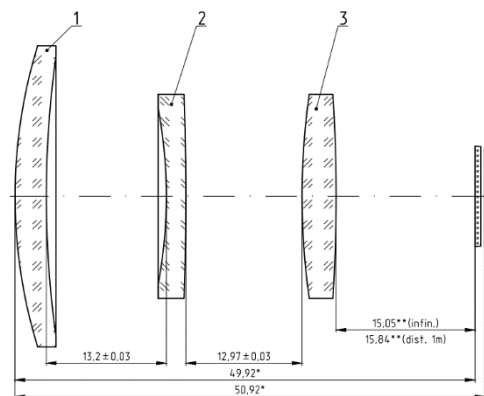


Рисунок 2 – Объектив $f' = 29$ мм

Для объектива тепловизора $f' = 29$ мм также исследованы Spot Diagram (величины GEO, RMS), MTF поля, кривизна и дисторсия. Представим график модуляционной передаточной функции (MTF) поля.

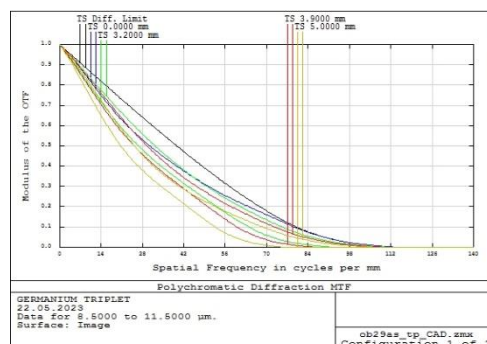


Рисунок 3 – MTF поля

Получены результаты.

Анализ геометрических аббераций и волновых критериев изображения показал, что объектив $f' = 40$ мм уступает по качеству объективу $f' = 29$ мм. Размеры пятна рассеяния для объектива $f' = 29$ мм составляют значения порядка 8,5 нанометров, в то время как размер пятна рассеяния объектива $f' = 40$ мм – до 30 нанометров. Сравнивая графики MTF отметим, что для пространственной частоты в 30 мм^{-1} для объектива $f' = 40$ мм и для частоты в 42 мм^{-1} для объектива $f' = 29$ мм значение контраста составляет 0,5–0,6; однако расстояния между сагитальными и тангенциальными составляющими в среднем у объектива $f' = 29$ мм меньше (астигматизм меньше), т. е. объектив лучше по полю. Это значит, что при отклонении пучков лучей от оси они не вызовут ухудшения или искажения изображения.

При сравнении графиков кривизны поля и дисторсии отметим, что эти абберации исправлены лучше в тепловизионном объективе $f' = 29$ мм по сравнению с базовым объективом $f' = 40$ мм.

Можно сделать вывод, что объектив $f' = 29$ мм превосходит по качеству изображения своего предшественника.

Литература

1. Запрыгаева, Л.А. Расчет и проектирование оптических систем / Л.А. Запрыгаева, И.С. Свешникова. – М. : Логос, 2000. – 584 с.
2. Артюхина, Н.К. Основы компьютерного моделирования оптических систем различных классов: учебно.-мет. пособие для вузов / Н.К. Артюхина. – Минск : БНТУ, 2016. – 182 с.

СЕКЦИЯ 5. МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ И СИСТЕМЫ

УДК 577.2.08

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ДЫХАНИЯ НА ОСНОВЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ

Люцко К.С., Абмётко Н.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В данной работе автор проводит анализ и сравнительный обзор различных сенсорных систем, их функциональности и применимости. Основной акцент делается на возможности создания инновационного устройства, способного непрерывно контролировать параметры дыхания и предоставлять рекомендации для диагностики и ухода за пациентами. Исследование имеет важное значение для развития медицинской технологии и улучшения качества обслуживания проблем, связанные с органами дыхания.

Ключевые слова: датчики дыхания; сенсорные системы.

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF CREATING A DEVICE FOR CONTROLLING BREATHING PARAMETERS BASED ON EXISTING SENSORY SYSTEMS

Lyutsko K.S., Abmetko N.V.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. In this work, the author conducts an analysis and comparative review of various sensor systems, their functionality and applicability. The main focus is on the possibility of creating an innovative device that can continuously monitor breathing parameters and provide recommendations for diagnosis and patient care. The research is important for the development of medical technology and improving the quality of care for respiratory problems.

Keywords: breathing sensors, sensory systems.

*Адрес для переписки: Абмётко Н.В., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: roni124@mail.ru*

Анализ возможности создания устройства для контроля параметров дыхания на основе существующих сенсорных систем является актуальной задачей в современной медицинской технологии. Дыхание является одним из важных физиологических показателей, которые могут быть использованы для оценки здоровья и диагностики различных заболеваний.

Существующие сенсорные системы предоставляют широкий спектр возможностей для измерения и контроля физиологических параметров, включая дыхание. Они основаны на принципах датчиков, которые регистрируют и анализируют изменения воздушных потоков, концентрации газов, а также других характеристик дыхательного процесса.

Результаты этого анализа могут привести к разработке эффективного и надежного устройства, которое будет способно предоставлять непрерывный мониторинг параметров дыхания, а также давать рекомендации и предупреждения в случае выявления аномалий. Это может иметь важное значение для медицинской диагностики, реабилитации и ухода за пациентами с дыхательными заболеваниями.

Особенно важное место в медицине критических состояний занимает отслеживание показателей функции дыхания с целью контроля процесса газообмена между организмом человека и окружающей средой. Основными ступенями этого процесса являются вентиляция газов в легких, обмен между альвеолярным воздухом и кровью, транспорт

газов кровью, обмен газов в тканях, клеточное дыхание. Оценка параметров физиологических систем, реализующих эти функции, в зависимости от вида клинического мониторинга обладает различной ценностью.

Задачей мониторинга респираторной функции в области анестезиологии является выявление специфических нарушений обмена газов, которые могут возникнуть из-за ошибок и осложнений при проведении интубации, использовании искусственной вентиляции легких (ИВЛ), возникновение дыхательных нарушений во время наркоза и послеоперационного периода. Методы контроля газового состава крови и анализа концентрации газов во вдыхаемой и выдыхаемой газовой смеси имеют наибольшее значение с точки зрения диагностики, которую мы можем провести [1].

Контроль газового состава крови включает в себя измерение уровней растворенного кислорода и углекислого газа. На практике клинического мониторинга особую значимость приобрело отслеживание оксигенации крови, что позволяет диагностировать состояние и предупреждать эпизоды гипоксемии и гипоксии. В то время как наблюдения за цветом кожи и слизистых оболочек, направленные на выявление цианоза, часто не обеспечивают достаточную точность при диагностике гипоксемии (до 40 % случаев оказывается невыявленными).

Наиболее точные результаты диагностики (почти 100 % точности) достигаются при применении

неинвазивных методов, таких как полярографическое измерение напряжения кислорода через кожу и пульсоксиметрия, которая позволяет определить уровень насыщения крови кислородом [1].

Методика пульсоксиметрии, широко применяемая в анестезиологической сфере, отличается отличной точностью в определении насыщения кислородом (чаще всего единицы процентов), высокой скоростью реакции (результат получается за прохождение нескольких сердечных циклов) и легкостью использования [1].

Кислород, находящийся в крови, главным образом переносится эритроцитами, где он образует химическую связь с гемоглобином (Hb). При соединении с гемоглобином кислород образует оксигемоглобин (HbO₂), что представляется в следующей реакции: $O_2 + Hb \rightleftharpoons HbO_2$. Уровень окисления гемоглобина зависит от концентрации растворенного кислорода в крови и описывается кривой диссоциации HbO₂ (рисунок 1), которая иллюстрирует зависимость степени насыщения гемоглобина кислородом (SaO₂) от уровня парциального давления кислорода (PO₂).

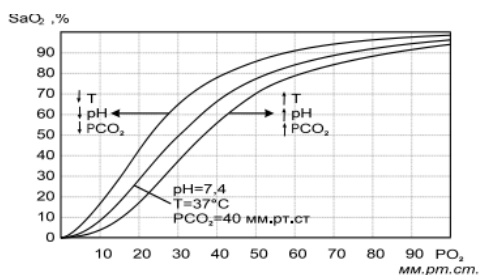


Рисунок 1 – Кривые диссоциации гемоглобина

Наибольшее внимание на данный момент уделяется созданию не одного конкретного сенсора, а комплексу, поэтому необходимо рассмотреть существующие варианты, а также варианты, находящиеся в активной стадии разработки. Следующее изобретение, например, относится к медицинской технике, а именно к аппаратно-программному комплексу для мониторинга жизненных показателей. Этот комплекс представляет собой надежно фиксируемую на груди майку, снабженную устойчивой конструкцией в области солнечного сплетения и плечевыми лямками, а также имеет точки крепления датчиков под грудью. Майка изготовлена из эластичного материала и оснащена системой гибкой полимерной проводки для передачи энергии от центрального устройства сбора данных. Само устройство включает в себя компонент для замены батареек и контроллер беспроводной связи, который также обеспечивает зарядку, а к нему можно подключить микромощные сенсоры. Дополнительно, на этом устройстве установлен аккумулятор и система уведомления о его низком заряде. Разъемы для

интерфейсов контроллера сделаны с возможностью подключения высокоамперных сенсоров.

Этот модульный комплекс сенсоров включает в себя ряд неинвазивных датчиков: биохимический датчик уровня лактата и глюкозы, работающий на основе биоэлектрохимического анализа пота (ДЛГ); датчик температуры и влажности кожи; электрокардиограф с 4–6 отведениями; мультиспектральный датчик пульсоксиметрии; датчик частоты и объема дыхания на основе тензометрии; датчик артериального давления. Кроме того, есть система датчиков для измерения двигательной активности как в целом теле, так и в отдельных его частях, суставах и конечностях, с записью кинематических параметров движения в реальном времени.

Обеспечивается мониторинг жизненных показателей с эффективным выявлением на ранней стадии патологии в работе органов, повышением качества жизни пациентов с приобретенным заболеванием, снижением рисков внезапной смерти или потери здоровья и трудоспособности [2].

Датчики дыхания являются важным инструментом в медицинской диагностике и контроле здоровья. Они предоставляют возможность измерять и анализировать параметры дыхания, что позволяет оценить дыхательную активность пациента и выявить потенциальные проблемы в дыхательной системе.

Так же важно отметить, что в работе были рассмотрены уже существующие датчики и даже целые, готовые к эксплуатации рабочие комплексы, которые уже используются в современном мире, следовательно, на их основе можно создать многофункциональное устройство для контроля параметров дыхания, описанных в работе. Учитывая то, что данные датчики весьма компактны, надежны и автономны весьма вероятно интегрировать их в повседневную жизнь человека, для повышения качества медицинского обслуживания и предупреждения возможных болезней.

На основании данной работы можно сделать вывод не только о необходимости продолжения развития науки в данном направлении, что уже активно наблюдается в современном мире, но и об обширной возможности для расширения систем мониторинга, следовательно, непосредственное стремление к повышению уровня здравоохранения.

Литература

1. Калакутский, Л.И. Аппаратура и методы клинического мониторинга : учебное пособие / Л.И. Калакутский, Э.С. Манелис. – Самара : СГАУ, 1999. – 160 с.
2. Аппаратно-программный комплекс для мониторинга жизненных показателей: патент РФ № 2729430 / А.А. Скворцов, И.А. Посельский. – Оpubл. 06.08.2020.

УДК 681

ПОВЫШЕНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ ОПТИЧЕСКИХ ЭНКОДЕРОВ

Берник Т.С., Хлебникова Е.В.

*ГБПОУ НСО «Новосибирский авиационный
технический колледж имени Б.С. Галушчака»
Новосибирск, Российская Федерация*

Анотация. Применение оптической системы для увеличения разрешающей способности энкодера.

Ключевые слова: энкодер, проекционная система, точность измерений.

INCREASING THE CONSUMER PROPERTIES OF OPTICAL ENCODERS

Bernik T.S., Khlebnikova E.V.

*GBPOU NSO "Novosibirsk Aviation
Technical College named after B.S. Galushchak"
Novosibirsk, Russian Federation*

Abstract. The use of an optical system to increase the resolution of the encoder.

Key words: encoder, projection system, measurement accuracy.

В современном обществе наука и промышленность не могут существовать без измерений. Каждую секунду в мире производятся многие миллиарды измерительных операций, результаты которых используются для обеспечения надлежащего качества и технического уровня выпускаемой продукции.

В настоящее время стремительно растут требования к точности измерений, скорости получения измерительной информации, качеству измерений. Огромный прорыв в этой области произвело создание оптических энкодеров.

Целью данной работы является исследование существующих видов оптических энкодеров их устройства и принципа работы.

Поставлена задача: повысить точность измерения оптического энкодера.

Энкодер – это устройство (прибор, датчик) для преобразования угловых положений или линейных перемещений в аналоговый или цифровой сигнал. Принцип работы энкодерного датчика заключается в преобразовании механического перемещения в электрические сигналы. Энкодер называют датчиком обратной связи, датчиком угловых положений или преобразователь «угол-код». Энкодерный датчик формирует и сообщает устройству управления верхнего уровня код точного положения вала за единицу времени [1].

Оптические энкодеры бывают двух типов: инкрементальные и абсолютные.

Инкрементальные энкодеры имеют диск прерывания с множеством окон одинакового размера на основном радиусе и две считывающих оптопары, что позволяет фиксировать как угол поворота, так и направление вращения вала. На вспомогательном радиусе диска размещено единственное окно прерывания и соответствующая оптопара, определяющие исходное положение. Минусом данного энкодера является то, что энкодеры выдают относительный отсчет угла поворота, информация о котором не сохраняется при

остановке вращения. К их преимуществам следует отнести простоту конструкции при высоком разрешении (и, соответственно, невысокую стоимость) и высокой рабочей частоте. Диск прерывания приведен на рисунке 1.

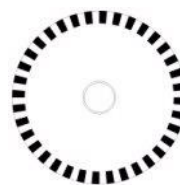


Рисунок 1 – Диск прерывания инкрементального энкодера

Инкрементальный энкодер состоит из следующих компонентов: источника света, диска с метками, фототранзисторной сборки и схемы обработки сигнала.

Диск пошагового энкодера подразделен на точно позиционированные отметки. Количество отметок определяет количество импульсов за один оборот [1].

Абсолютный энкодер имеет диск прерывания с концентрическими окнами на разных радиусах, относительные размеры которых определяют двоичным кодом, и которые считываются одновременно, давая кодированный выходной сигнал для каждой угловой позиции (код Грея, бинарный код). Этот тип энкодера позволяет получать данные о мгновенном положении вала без цифрового счетчика или возврата к исходному положению. Основным же преимуществом абсолютного энкодера перед инкрементальным является функция сохранения текущего значения углового перемещения вне зависимости от того, подано питание на датчик или нет. Код Грея приведен на рисунке 2.

Разрешающая способность энкодера – это наименьшее или наибольшее отклонение в положении, которое он может измерить. В первую очередь разрешающая способность влияет на точность измерения скорости вращения вала (для

инкрементального энкодера) и на точность определения положения (для абсолютного энкодера).



Рисунок 2 – Диск на кодах Грея

В энкодерах на дисках присутствуют два типа ячеек: проходная (светлая) и темная (непроходная). Для того чтобы энкодер сработал, а именно выдал сигнал, необходимо смена проходных и непроходных ячеек для инкрементальных энкодеров, а для абсолютных, требуется кодировка из непроходных элементов. При этом непроходная (темная) область должна превышать геометрические размеры приемника для ликвидации паразитной засветки приемника и для формирования четкого фронта роста и затухания импульса, для инкрементального энкодера, а для абсолютного энкодера кодировка должна осуществлять перекрытие пикселей фотоприемника. Следовательно, разрешающая способность энкодера зависит в первую очередь от чувствительности фотоприемника. Чувствительность фотоприемника зависит от площади, следовательно, для того, чтобы увеличить разрешающую способность необходимо уменьшить площадь непроходной ячейки, что влечет за собой уменьшение площади приемника. В связи с чем, необходимо увеличить световой поток от источника, что влечет за собой увеличение потребляемой мощности источника света и его габаритных размеров. А также, большой световой поток может привести к выходу из строя информационного диска. Для решения этой проблемы требуется увеличить размер непроходной ячейки, но при этом необходимо, чтобы непроходная ячейка имела минимальный размер, что

противоречит друг другу. Вопрос решается применением проекционной системы между информационным диском и приемником, она позволяет закрыть приемник при прежних размерах приемника, но при этом непроходную ячейку значительно уменьшить в количестве раз равное увеличению проекционной системы. Предлагаемая конструкция приведена на рисунке 3

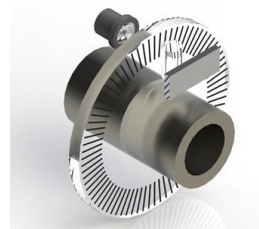


Рисунок 3 – Конструкция энкодера с проекционной системой

В современном мире большое значение имеет точность, с которой можно провести необходимые измерения. В оптических энкодерах точность ограничена разрешающей способностью прибора. В настоящее время предлагаются различные конструкторские решения, которые позволили бы повысить разрешающую способность энкодера, например, увеличение частоты излучателя, но все они дают малый прирост разрешающей способности при значительном удорожании прибора. В данной работе произведен анализ существующий конструкций оптических энкодеров. Предложена новая идея, по повышению точности измерения – использование проекционной системы между диском и приемником. При невысокой стоимости и простоте конструкции это дает значительное увеличение разрешающей способности прибора.

Литература

1. Серебряков, А.С. Автоматика: учебник и практикум СПО / А.С. Серебряков, Д.А.Семенов, Е.А. Чернов.; под общ.ред. А.С. Серебрякова. – М.: Юрайт, 2018. – 431 с.

УДК 681.586

МЭМС-ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ

Люцко К.С., Гайкевич Д.Н.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. МЭМС-датчики давления широко применяются в автомобильной, аэрокосмической промышленности и медицине. В работе рассмотрены основные преимущества, разновидности и перспективы развития рассмотренной технологии.

Ключевые слова: МЭМС, датчик, давление, устройство, кремний.

PRESSURE SENSORS Liutsko K.¹, Gaikевич D.¹

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. MEMS pressure sensors are widely used in automotive, aerospace industry and medicine. The paper considers the main advantages, varieties and prospects of development of the considered technology.

Key words: MEMS, sensor, pressure, device, silicon.

Адрес для переписки: Люцко.К.С., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: liutsko@bntu.by

МЭМС-датчики давления – компактные и высокоэффективные устройства используемые для измерения давления в различных областях, таких как медицина, автомобильная, навигационная и аэрокосмическая промышленность.

Физические параметры устройства изменяются в зависимости от давления измеряемой среды и регистрируются микромеханической структурой. Диапазон измерения может быть как широким, так и узким и зависит от цели применения.

Основными преимуществами МЭМС-датчиков давления являются:

- компактность и миниатюрность. Эти малогабаритные устройства изготавливаются с использованием микроэлектронных и микромеханических технологий, обеспечивая тем самым легкость интеграции в различные системы и устройства с ограниченным пространством;

- низкая стоимость производства. Снизить стоимость и увеличить доступность для более широкого применения позволяет использование массовых производственных технологий: МЭМС-технология или кремниевые пластины (SOI);

- высокая чувствительность и точность. Занимают важное место в медицине и автомобильной промышленности за счет возможности фиксировать небольшие изменения давления, тем самым обеспечивая достоверные данные за счет высокой чувствительности и точности измерений устройства;

- быстроедействие и высокая скорость измерений. За счет быстрого отклика и способности проводить измерения в режиме реального времени, МЭМС-датчики давления находят широкое применение в условиях требующих высокой скорости обработки данных и мониторинга динамических процессов;

- широкий диапазон измерений. МЭМС-датчики давления могут работать в различных диапазонах измерений, делая их универсальными для применения в различных средах и условиях;

- надежность и стабильность. Способность сохранять свои характеристики на протяжении длительного времени без значительного снижения производительности делает МЭМС-датчики давления устройствами обладающими высокой стабильностью и надежностью;

- энергоэффективность. Потребление низкого количества энергии делает МЭМС-датчики давления энергоэффективными и способствует продолжительному времени автономной работы [1].

Существует несколько типов МЭМС-датчиков давления, каждый из которых имеет свои особенности и применяется в зависимости от конкретных требований:

- пьезорезистивные датчики давления. В данных устройствах используется пьезорезистивный эффект, в результате чего изменение давления приводит к механической деформации резистивного материала. Как следствие происходит изменение сопротивления которое измеряется и преобразуется в соответствующий электрический сигнал. Пьезорезистивные датчики давления изготавливаются из кремния или полупроводниковых материалов;

- емкостные датчики давления (рисунок 1). Принцип работы этих датчиков основан на фиксации изменения емкости между двумя электродами при изменении давления, за счет изменения расстояния между электродами или изменения диэлектрической проницаемости внутри сенсора. Изготавливаются из кремния или полимерных материалов;

- резонаторные датчики давления. В основу работы данного типа датчиков взято измерение резонансной частоты механического резонатора при изменении давления. Изменение давления меняет массу или жесткость резонатора, что приводит к изменению его резонансной частоты. Требуют более сложных схем измерения, но обладают высокой точностью и стабильностью.

Механический резонатор может быть выполнен в виде пьезокристалла, мембраны или нити;

– терморезистивные датчики давления. Данный тип датчиков фиксирует изменение сопротивления терморезистивного элемента под воздействием давления. При изменении давления меняется теплопроводность датчика, что приводит к изменению его сопротивления. Терморезистивные датчики изготавливаются из пьезорезистивных материалов: поликристаллический кремний или полисиликон;

– пьезоэлектрические микромеханические датчики давления (рисунок 2) являются разновидностью датчиков, использующих эффект пьезоэлектричества для измерения давления. В этих датчиках используются пьезоэлектрические материалы: кварц, пьезокерамика или пьезополимеры. В результате воздействия давления на эти материалы происходит механическая деформация, вызывающая генерацию электрического заряда, который измеряется и преобразуется в соответствующий давлению электрический сигнал.

Это лишь несколько примеров разновидностей МЭМС-датчиков давления, каждый из которых имеет свои особенности и применяется в различных областях, в зависимости от требований точности, диапазона измерений, компактности и других параметров.

С развитием МЭМС-технологий ожидается появление еще более компактных и мощных датчиков давления. Это позволит улучшить производительность автомобилей, медицинских приборов, мобильных устройств и других технических систем.

МЭМС-датчики давления представляют собой важную и перспективную разработку, которая продолжает прогрессировать и находить большее применение в современном мире.

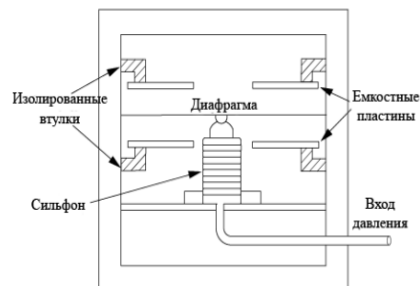


Рисунок 1 – Емкостный датчик давления

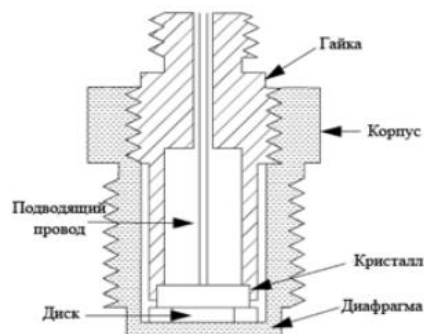


Рисунок 2 – Пьезоэлектрический датчик давления

Литература

1. Фрайден, Дж. Современные датчики / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера, 2005. – 592 с.

УДК 621.791.03

ПРИМЕНЕНИЕ АЗОТОВОДОРОДНОЙ СМЕСИ В ТЕХНОЛОГИИ МОНТАЖА КРИСТАЛЛОВ И ПРОВОЛОЧНЫХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ В ИЗДЕЛИЯХ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Галацевич В.В., Петухов И.Б.

ОАО «Планар-СО»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной работе рассматривается применение азотноводородной смеси и оборудование для ее подачи в зону обработки в технологии монтажа кристаллов и проволочных межсоединений. Также особое внимание уделено ультразвуковой и вибрационной пайке.

Ключевые слова: азотноводородная смесь, ультразвуковая пайка, монтаж кристаллов и проволочных выводов, оксидный слой.

APPLICATION OF NITROGEN-HYDROGEN MIXTURE FOR CHIP BONDING TECHNOLOGY AND WIRE BONDING IN ELECTRONIC DEVICES

Galatsevich V., Petuhov I.

"Planar-SO" joint stock company
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The application of hydrogen-nitrogen mixture and equipment for its supply to the processing zone in the technology of chip and wire bonding are considered. Special attention is also paid to ultrasonic and vibration soldering.

Key words: nitrogen-hydrogen mixture, ultrasonic soldering, chip and wire bonding, oxide layer.

Адрес для переписки: Галацевич В.В., Партизанский пр-т, 2-1а, г. Минск, 220033, Республика Беларусь
e-mail: vika.galatsevich@mail.ru

В данной работе были проведены исследования технологии монтажа кристаллов и проволочных межсоединений, с использованием азотноводородной смеси для данных технологий.

В электронной промышленности для монтажа полупроводниковых кристаллов к основаниям корпусов применяют различные методы: пайку припоями и эвтектическими

сплавами, а так жеприсоединение с использованием композитного клея.

Выбор способа монтажа полупроводниковых кристаллов во многом зависит от требований, предъявляемых к проволочным межсоединениям кристалл-корпус, а также методу, применяемому для микросварки выводов на кристалле и корпусе и режимов герметизации приборов. В зоне паяных соединений должны отсутствовать трещины и отслоения покрытия, непропаяные участки для обеспечения протекания больших токов [1].

В данной работе особое внимание уделялось процессам ультразвуковой и вибрационной пайки, а также темрмозвуковому присоединению медной проволоки к контактными площадкам.

Ультразвуковая пайка – это процесс соединения материалов с использованием ультразвуковой энергии. Основой этого процесса является генерация ультразвуковых волн с частотой выше предела слышимости человеческого уха (обычно в диапазоне от 50 кГц до 100 кГц) и их направленное воздействие на поверхность материалов, которые необходимо соединить. Применение ультразвуковой энергии вызывает ряд физических и химических процессов, которые способствуют получению равномерного паяного шва и минимизации выплесков припоя по периферии кристалла.

Ультразвуковые колебания генерируются при помощи ультразвукового преобразователя, который преобразует переменный электрический сигнал в механические колебания. Эти механические колебания передаются через волновод и рабочий инструмент (присоску) с кристаллом, прижимая его к поверхности присоединения.

Ультразвуковые механические колебания создают на границе соединения материалов равномерное растекание припоя или эвтектического спая, выталкивая органические включения на периферию зоны пайки и способствуя этим лучшему смачиванию припоя и качеству пайки.

Вибрационная пайка – это процесс соединения двух компонентов с использованием низкочастотной вибрации и дополнительного нагрева. Эта технология позволяет проводить монтаж кристаллов по методу эвтектической пайки предостаточно высокой температуре рабочей поверхности (310–400 °С) и пайке с использованием оловянно-серебряных припоев при относительно низкой температуре (240–260 °С) к корпусам с никелевым покрытием.

При вибрационной пайке компоненты, которые должны быть соединены, должны быть хорошо очищены от окислов и загрязнений. Это обеспечивает надежное соединение. Компоненты размещаются на месте соединения, при этом обеспечивается нужное положение и ориентация.

Для предотвращения окисления в процессе пайки поверхности должны быть защищены от воздействия окружающей среды. Чаще всего при

этом используется формирующий газ на основе азота и водорода, при этом водород играет роль раскислителя.

Низкочастотные вибрации передаются в обрабатываемые материалы посредством вибрации рабочего инструмента (присоски). Это создает относительные движения между поверхностью кристалла и присоединяемой поверхностью. Высокая температура рабочей зоны образует эвтектический сплав кремния и покрытия основания корпуса (обычно золотое), и вибрация инструмента способствует образованию равномерного паяного шва. Получаемые эвтектические соединения кремния и золота отличаются высокой прочностью получаемых соединений.

Метод ультразвукового присоединения проволоки к контактными площадкам, основан на одновременном действии температуры, ультразвуковых колебаний и давления. Особого внимания заслуживает метод «шарик-клин»: присоединение проволоки к контактной площадке происходит оплавленным кончиком проволоки в шарик [2]. Основным преимуществом данного присоединения является возможность получения присоединения разнородных материалов.

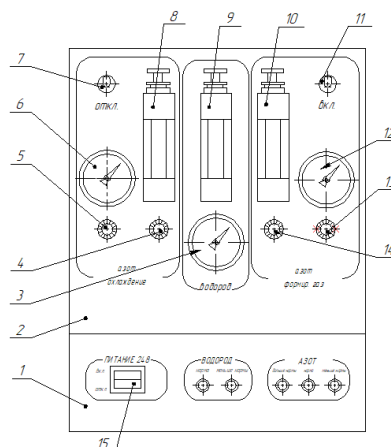


Рисунок 1 – Блок формирования газовой смеси:
1, 2, 15 – панели, 3, 6, 12 – манометры, 4, 14 – краны (дрессели), 5, 13 – регуляторы давления, 7, 11 – тумблеры включения, 8, 9, 10 – ротаметры, 15 – тумблер

Процесс соединения проволоки способом «шарик-клин» осуществляется в несколько этапов: формирование шарика, контактирование и предварительная деформация, ультразвуковое и термическое воздействие. Весьма важным этапом является формирование шарика, которое происходит посредством расплавления проволоки искровым разрядом между электродом разрядника и концом проволоки. Материалами для выводов могут послужить золото, алюминий и его сплавы с кремнием и магнием и медь. Использование любого из перечисленных материалов имеет свои преимущества и недостатки [3].

Для обеспечения необходимой смачиваемости припоя и предотвращения окисления в процессе пайки применяется инертный газ или азотноводородная смесь, включающая в себя 10%-ный водород и 90%-ный азот. При ультразвуковом приедении медной проволоки данная смесь состоит из 95 % азота и 5 % водорода.

С помощью азотноводородистой смеси не только происходит удаление окисла с кристалла и подложки, но также с ее помощью можно произвести обезжиривание поверхности и удаление остатков флюса. В методе «шарик-клин» присоединения медной проволоки данная смесь способствует получению правильной формы шарика, при этом скорость подачи смеси имеет важное значение. В случае недостаточного или избыточного расхода смеси происходит образование асимметричных шариков.

Азотноводородистая смесь подается в зону обработки с помощью специального оборудования.

В данном случае использовался блок формирования газовой смеси, который представлен на рисунке 1. Он обеспечивает подачу азотноводородистой смеси с заданными пропорциями азота и водорода. Это позволяет обеспечить надежное соединение кристалла с подложкой и защитить соединяемые поверхности от окисления.

Литература

1. Зенин, В.В. Монтаж кристаллов и внутренних выводов в производстве полупроводниковых изделий / В.В. Зенин. – Воронеж, 2013. – 10 с.
2. Петухов, И.Б. Оптимизация ультразвуковой системы в технологии присоединения медной микропроволоки в изделиях электроники / И.Б. Петухов, В.Л. Ланин // Ультразвук: проблемы, разработки, перспективы: материалы научно-технической конференции. Уфа, 25–29 сент. 2017. – Уфа : БашГУ, 2017. – 62 с.
3. Ланин, В.Л. Термозвуковое присоединение медной проволоки к контактным площадкам / В.Л. Ланин, И. Петухов // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2011. – № 2 (00031). – 132 с.

УДК 681.586

ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ С ЕМКОСТНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Довгаль М.И., Люцко К.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Датчик давления с емкостным преобразователем – это устройство, которое измеряет давление жидкости или газа с помощью изменения емкости конденсатора. Датчик давления с емкостным преобразователем имеет высокую точность, надежность и долговечность, а также может работать в широком диапазоне температур и частот.

Ключевые слова: датчики, емкостной преобразователь.

PRESSURE SENSOR WITH CAPACITIVE TRANSDUCER

Dovgal M., Liutsko K.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. A capacitive pressure transducer is a device that measures the pressure of a liquid or gas by changing the capacitance of a capacitor. The pressure transducer with a capacitive transducer is highly accurate, reliable and durable, and can operate over a wide range of temperatures and frequencies.

Key words: sensor, capacitive transducer.

*Адрес для переписки: Довгаль М. И, пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: max_dovgal@mail.ru*

Значительную роль в системах контроля и управления играет давление. В качестве тактильных датчиков, для распознавания формы или определения силы захвата, а также в качестве привода в последние годы особый интерес к датчикам давления проявляется в робототехнике.

Для всех этих систем необходимо создание оборудования, где основными компонентами являются датчики давления. Они предоставляют информацию о давлении газов и жидкостей, помогающих определить правильное функционирование механизмов, машин и систем, обеспечивающих функционирование процессов.

Широкий спектр предъявляемых требований (зависящий от производства, транспортировки

или научных исследований) привел к разнообразию применяемых датчиков. Это разнообразие связано с тем, что понятие «давление» охватывает большой диапазон значений: от глубокого вакуума до сверхвысокого давления. Давление выражается в абсолютных (относительно вакуума) или относительных (относительно атмосферного давления) величинах. Измерение давления связано с различными средами и жидкостями, характеристики которых разнообразны [1].

Одним из распространенных видов датчиков давления являются емкостные (датчики давления с емкостным преобразователем). (емкостные датчики давления). Принцип их работы основан на изменении емкости в зависимости от при-

ложенного давления. Емкостной датчик давления состоит из двух параллельных пластин, одна из которых подвижная, а другая неподвижная. Между пластинами создается емкостной зазор. Под воздействием сжатия или растяжения, изменяется емкость между пластинами. Это изменение емкости преобразуется в соответствующий электрический сигнал, который можно измерить и рассчитать значение давления.

Преимуществами датчиков давления с емкостным преобразователем являются:

- высокая точность и стабильность измерений;
- высокое разрешение и малый дрейф показаний с течением времени;
- большой диапазон измеряемых давлений, позволяющий применять их во многих системах.

Емкостные датчики используются:

- в автомобильной промышленности (контроль давления в системах топлива, тормозов и пневматических систем);
- медицинской технике (аппараты и мониторы для измерения давления крови, дыхания и других параметров);
- для контроля и измерения давления в системах воздушного и газового сжатия, отопления и вентиляции;
- для контроля и управления процессами в других сферах требующих точного измерения давления;
- при проведении научных исследований, где точность является важным параметром.

Необходимо отметить, что выбор конкретного типа датчика давления зависит от требуемой точности, диапазона измерений, условий окружающей среды и других факторов, связанных с конкретными задачами.

Емкостные датчики обладают преимуществами, которые делают их привлекательными для многих систем:

- высокая точность. Емкостные датчики обеспечивают высокую точность измерений, что важно во многих промышленных и научных системах, где точность контроля давления играет решающую роль;
- широкий диапазон измерений. Измеряют давление в большом диапазоне значений, начиная с очень низких и заканчивая очень высокими;
- высокая стабильность. Датчики давления с емкостным преобразователем обладают стабильностью измерений во времени;
- быстрый отклик. Могут обеспечивать быстрый отклик на изменения давления. Это важно в системах, где требуется мгновенная реакция на изменения давления;
- компактный и надежный дизайн. Датчики давления с емкостным преобразователем имеют компактный размер и легкий вес, высокую надежность и долговечность, что делает их удобными для установки;

– сопротивление к воздействию среды: емкостные датчики могут быть защищены от воздействия агрессивных сред, таких как химические вещества или пыль, путем использования защитных покрытий или прокладок;

– низкое энергопотребление. Датчики с емкостным преобразователем потребляют небольшое количество энергии, что обеспечивает экономичную работу и является важным фактором при использовании в портативных устройствах или при работе от батарей.

В целом, емкостные датчики являются эффективными и надежными средствами измерения давления, которые широко применяются в различных отраслях и системах, где требуется точный и надежный контроль давления.

Конструкция датчиков давления с емкостным преобразователем может варьироваться в зависимости от производителя и конкретной модели. Но, в общем случае, они состоят из следующих основных компонентов:

– диафрагма. Диафрагма представляет собой тонкую, гибкую мембрану, которая подвергается давлению. Обычно изготавливается из материалов, таких как кремний или нержавеющая сталь. Изменение давления приводит к деформации диафрагмы, что изменяет ее емкость;

– параллельные пластины. Диафрагма располагается между двумя параллельными пластинами. Одна из пластин является подвижной, а другая неподвижной. При деформации диафрагмы изменяется расстояние между пластинами, что изменяет ее емкость;

– электрическая цепь. Емкостной датчик давления подключается к электрической цепи, измеряющей изменение емкости. Электрическая цепь может быть организована с использованием различных схем, включая переменные резисторы, конденсаторы и операционные усилители;

– сигнальная обработка. Изменение емкости преобразуется в электрический сигнал, который может быть обработан и интерпретирован. Для этого используется аналоговая или цифровая сигнальная обработка, включая усиление, фильтрацию, линеаризацию и преобразование сигнала в цифровой формат;

– выходной сигнал. Полученный сигнал представляет значение давления и может быть выведен на дисплей, передан в контрольную систему [2].

Важно отметить, что датчики давления с емкостным преобразователем имеют различный диапазон измерений, точность, устойчивость к внешним воздействиям и другие характеристики, зависящие от конкретной модели и производителя.

Еще одним важным аспектом емкостных датчиков является их универсальность и применимость в различных средах. Они могут измерять давление сжатого воздуха, газов, пара, жидкостей, включая масло и другие жидкости.

При выборе датчика давления с емкостным преобразователем следует учитывать несколько факторов, такие как требуемый диапазон измерений, точность, стабильность, линейность, устойчивость к воздействию окружающей среды (температура, влажность, вибрации) и электромагнитные помехи.

Важно обратиться к документации и руководству по эксплуатации, предоставляемым производителем, для получения подробной информации о

конкретном датчике давления с емкостным преобразователем, включая его технические характеристики, подключение и эксплуатацию.

Литература

1. Распопов, В.Я. Микромеханические приборы / В.Я. Распопов. – М. : Машиностроение, 2007. – С. 47–82.
2. Вавилов, В.Д. Микросистемные датчики физических величин / В.Д. Вавилов, С.П. Тимошенко, А.С. Тимошенко. – М. : Техносфера, 2018. – 550 с.

УДК 663.15+ 577.151

МАКЕТ БИОСЕНСОРА НА ОСНОВЕ ГЛЮКОЗООКСИДАЗЫ Корякин С.В.¹, Михалёнок Е.В.¹, Шарко С.А.²

¹Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ
²ГО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной работе разработана конструкция макета ферментного биосенсора и определены технологические требования к элементам конструкции. Установлены оптимальные режимы для селективного определения концентрации глюкозы в биологических жидкостях. Разработанный макет биосенсора может найти применение в медицинской диагностике.

Ключевые слова: полимерные пленки, иммобилизация биокатализаторов, полимеризация, ферментный биосенсор.

PROTOTYPE OF BIOSENSOR BASED ON GLUCOSE OXIDASE Koriakin S.¹, Mihalionok E.¹, Sharko S.²

¹A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University
²Scientific-Practical Materials Research Centre NAS of Belarus
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. In this work, the design of the enzyme biosensor layout has been developed and the technological requirements for the design elements have been determined. Optimal modes for selective determination of glucose concentration in biological fluids have been established. The developed biosensor layout can find application in medical diagnostics.

Key words: polymer films, immobilization of biocatalysts, polymerization, enzyme biosensor.

Адрес для переписки: Корякин С.В., ул. Курчатова, 7, г. Минск, 220045, Республика Беларусь
e-mail: nil28@mail.ru

Наиболее распространенным и применимым средством индикации в диагностике в медицине, фармацевтической и пищевой промышленности является использование ферментных систем [1]. Для определения глюкозы в биологических жидкостях наиболее распространенными являются биосенсоры, принцип которых основан на ферментативном амперометрическом методе анализа [2]. Данный метод основан на возникновении электрического тока в результате окислительно-восстановительной реакции перекиси водорода, который является продуктом ферментной реакции окисления глюкозы. Широкое использование данного метода объясняется возможностью определения химических веществ в растворе, в частности, глюкозы в крови, с высокой скоростью, селективностью и количественной точностью при относительно низкой температуре реакции (не выше 37 °С).

Однократное применение биологических катализаторов ограничивается их дороговизной и

рядом функциональных недостатков. Поэтому актуальным является создание многоцветных биосенсоров, которые позволяют проводить до 1000 измерений на протяжении нескольких месяцев без значительного изменения функциональных параметров. Большинство современных биосенсоров имеют конструкцию: верхний слой – мембрана, в которой происходит пробоотбор; функциональный слой – содержит биокатализаторы, и в котором происходят химические или биологические реакции с образованием свободных электронов; нижний слой – трансдюсер, в котором происходит преобразование результата химической реакции в измеряемый электрический сигнал.

В данной работе была разработана конструкция макета многоцветной биоэлектрохимической тест-системы с ферментным электродом для определения глюкозы; определены технологические требования к элементам конструкции. Конструкция макета представляет собой трансдюсер

с нанесенными на диэлектрическую подложку (ситалл и анодированный алюминий) электроды, изготовленные послойно методами трафаретной печати, и функциональные ферментные слои, наносимые вручную через трафарет.

Исследования показали независимость электрохимических свойств биосенсора от материала подложек (ситалл и анодированный алюминий).

За основу электродной системы взята химическая трехэлектродная ячейка, которая позволяет с достаточно высокой точностью проводить качественный и количественный анализ компонент в биологических жидкостях с точностью до 10^{-6} моль/л [1]. В качестве рабочего использовался платиновый электрод Pt; в качестве сравнения – хлорсеребряный электрод Ag/AgCl; противозлектродом (вспомогательный), замыкающим цепь, являлся серебряный электрод Ag, площадь поверхности которого была в 10 раз больше площади рабочего электрода (рисунок 1).

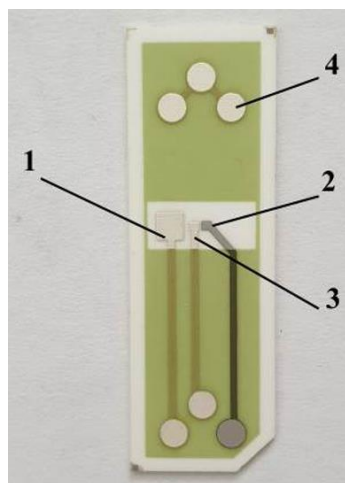


Рисунок 1 – Внешний вид траньюссера:
1 – вспомогательный Ag электрод; 2 – Pt рабочий (индикаторный) электрод; 3 – Ag/AgCl электрод сравнения; 4 – группа контактов для идентификации типа диагностической тест-системы

Идеальным методом для формирования слоев электродов являются вакуумные методы нанесения. Нами использовался более технологически простой метод трафаретной печати. Определены оптимальные составы паст и условия синтеза. Для формирования серебряных электродов (противозлектрода и электрода-сравнения) использовалась проводниковая паста на основе серебра ППС-2; для создания индикаторного электрода - паста на основе платины ППЛ-2. Пасты должны содержать в своем составе и в составе органических связующих минимальное количество неорганических примесей. Важно, чтобы после нанесения пасты на основе платины на ситалловую подложку и просушки подложку нагревают до температуры вжигания от 900 до 1400 °С длительностью от 30 до 120 минут, при которой происходит удаление

органической связки, закрепление электродов на поверхности и формирование газопроницаемой структуры электродов. Толщина слоев электродов определялась удельным сопротивлением материалов электродов и составляла 0,1–0,3 мм. Далее хлорсеребряный электрод был полечен потенциостатическим трехэлектродным методом в водном растворе 0,1 М HCl при положительном потенциале $U = 0,25$ В на электроде сравнения в течение 10 минут при $T = 18$ °С.

Для регистрации электрического сигнала с высокой селективностью и точностью были подобраны структура функционального слоя и фонового электролита. Функциональный слой: слой берлинской лазури, смешанной с целлюлозой толщиной не более 0,05 мм; слой на основе ацетата целлюлозы (смесь ацетата целлюлозы, ДМФ, глицерина и кремнезема) содержали фермент глюкозооксидаза класса оксидоредуктаз с активностью 800 тыс. ед./мл производства Института микробиологии НАН Беларуси. Концентрация фермента в слое варьировалась с целью оптимизации чувствительности и скорости срабатывания сенсора. Берлинская лазурь и фермент в количестве от 30 до 60 мкл последовательно физически адсорбировались на коллоидный графит и вводились в полимер. Ферментный слой был устойчив к многократным длительным промывкам системным раствором на основе фосфатного буфера. Результаты исследования показали, что биосенсор с использованием фоновых электролитов на основе НФБ 0,1 М с концентрацией 20 ммоль КСl рН = 7,0 является более чувствительным. Совместно использование данного буфера с медиаторами на основе берлинской лазури позволяет улучшить селективность.

Верхний защитный слой представлял полимеризованную пленку на основе смеси ПВС, лаурилсульфат натрия, гидроксиэтил целлюлозы и кремнезема. Толщина верхнего слоя составляла не более 0,02 мм. Этот слой имел хорошую набухаемость в процессе измерений и пропускную способность используемых жидких растворов.

Основными методами исследования функциональных свойства полученных биосенсорных структур были хроно-амперометрические и циклические вольт-амперометрические измерения. Так же были проведены ИК-спектроскопия полимерных пленок, с целью проверки химических составов функциональных слоев, и РЭМ, совмещенная с ЭЗМА для исследования морфологии поверхности электродов с изучением возможности улучшения физической адсорбции функциональных слоев.

Оптимальные режимы для селективного определения концентрации глюкозы в биологических жидкостях реализуются при потенциалах электрода сравнения $U = 0,58$ В и вспомогательного электрода $U_{ref} = 0,58$ В относительно рабочего электрода. Получена скорость срабатывания тест-системы – 6–8 сек.

Результаты исследования будут использованы при разработке многоцветных ферментных чип-сенсоров диагностики патологий углеводного обмена в крови.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной программы научных исследований «Биотехнологии – 2» на 2021-2025 годы (Подпрограмма «Микробные биотехнологии-2» НИР 2 задание 3.5).

Литература

1. Биосенсорные технологии в медицине: от детекции биохимических маркеров до исследования молекулярных мишеней (обзор) / Б.Г. Андриков [и др.] // Биосенсорные технологии в медицине. – 2020. – № 6 (12). – С. 70–85.
2. Mikhelson, K.N. Advances and trends in ionophore-based chemical sensors / K.N. Mikhelson, M.A. Peshkova // Russian Chemical Reviews. – 2015. – Т. 84, № 6. – С. 55.

УДК 615.477.2

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ БИОНИЧЕСКИМИ ПРОТЕЗАМИ ВЕРХНИХ И НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ

Кудина А.В.¹, Габец В.Л.², Франко Е.П.³

¹Белорусский государственный университет информатики и электроники

²Белорусский национальный технический университет

³Ресурсный центр ЭкоТехноПарк – Волма УО «Республиканский институт профессионального образования»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. При разработке био- или нейроуправляемых биотехнических устройств первоочередной задачей является определение достоверного способа получения информации о траектории совершаемого движения. Общая концепция бионических систем управления конечностями заключается в регистрации сигналов головного мозга и преобразование их в двигательные команды для бионического устройства, для чего необходимо применить наиболее точный и достоверный метод.

Ключевые слова: бионические протезы верхних и нижних конечностей, биопотенциалы, электромиография.

INNOVATIVE METHODS FOR CONTROLLING BIONIC PROSTHESES OF UPPER AND LOWER LIMBS

Kudina A.V.¹, Gabets V.L.², Franko E.P.³

¹Belarusian State University of Informatics and Electronics

²Belarusian National Technical University

³Resource center EcoTechnoPark – Volma EE "Republican Institute of Professional education"

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. When developing bio- or neuro-controlled biotechnical devices, the primary task is to determine a reliable method for obtaining information about the trajectory of the movement being performed. The general concept of bionic limb control systems is to register brain signals and convert them into motor commands for a bionic device, for which it is necessary to apply the most accurate and reliable method.

Key words: bionic prostheses of the upper and lower extremities, biopotentials, electromyography.

Адрес для переписки: Габец В.Л., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: vgabets@bntu.by

Ключевой задачей протезирования является восстановление функциональности конечностей. В последнее десятилетие разработчики современных протезов смогли достичь значительных достижений в создании бионических протезов нижних и верхних конечностей.

Бионические протезы – это протезы, которые управляются микропроцессором или компьютером, которые обладают рядом дополнительных преимуществ в сравнении с механическими протезами: повышенная мобильность и функциональность, безопасность. Бионические протезы оснащены передовыми сенсорными устройствами, моторикой искусственных мышц, которые позволяют управлять ими с помощью мышеч-

ного аппарата и путем передачи нервных импульсов. Разработка более легких устройств, появление микропроцессоров, компьютерных чипов и робототехники в современном медицинском приборостроении предназначено для возвращения пациентов к жизни.

Общая концепция бионических систем управления конечностями заключается в том, чтобы регистрировать сигналы головного мозга и преобразовывать их в двигательные команды для бионического устройства. Принцип действия биоэлектрических протезов основан на том, что после ампутации на культе остается часть мускулатуры, которая может сокращаться. Это приводит к появлению в мышце электрического потенциала,

который считывается и передается на микропроцессор протеза [1].

В последнее десятилетие различные робототехнические устройства все шире применяются в медицинской сфере. Это тесно связано с развитием соответствующей элементной базы мехатронных и сенсорных устройств, разработкой биологически безопасных материалов, а также методов получения и обработки информации о состоянии и функционировании отдельных органов человека. При разработке био- или нейрорегулируемых биотехнических устройств первоочередной задачей является определение способа получения информации о траектории совершаемого движения.

В современных биотехнических средствах класса систем взаимодействия человек-компьютер (Human Computer Interaction – HCI) используют биопотенциалы: электроэнцефалограммы (ЭЭГ), электромиограммы (ЭМГ), электронейрограммы (ЭНГ), электроокулограммы (ЭОГ). Широкое распространение получило использование электромиограммы [2]. Наиболее совершенным является метод регистрации колебаний напряжения мышц при помощи датчиков, преобразующих механические изменения движения в электрические, регистрируемые приборами. Электромиография – это метод исследования биоэлектрических потенциалов, возникающих в мышцах человека при возбуждении мышечных волокон с последующей регистрацией электрической активности мышечных волокон. Миографы различных конструкций обеспечивают регистрацию изотонических или изометрических сокращений мышечного аппарата. Различают спонтанную электромиограмму, отражающую состояние мышц в покое или при мышечном напряжении (произвольном или синергическом), а также вызванную, обусловленную электрической стимуляцией мышцы или нерва. Метод позволяет проводить топическую диагностику поражения нервной и мышечной систем (спинномозговых корешков и нервов, надсегментарных пирамидных и экстрапирамидных структур, мотонейронов передних рогов, нервно-мышечного синапса и собственно иннервируемой мышцы). Начало сокращения мышц инициируется электрическими импульсами в нервных стволах, приходящих в мышечные волокна. Эти импульсы деполяризуют мембрану клеток мышечных волокон, в результате чего в последних создается потенциал действия, который быстро распространяется по нервному волокну, что приводит к его сокращению. Сокращение инициируется этим потенциалом действия, а сам процесс сокращения гораздо длительнее по времени. При применении игольчатых (инвазивных) или поверхностных электродов, можно зарегистрировать сумму потенциалов действия всех вовлеченных в процесс клеток. Последующая обработка и извлечение информации ЭМГ позволяет реализовать

управление техническими устройствами, например, биоэлектрическими протезами [2].

Создание устройств данного типа особенно перспективно для восстановления движений после ампутаций и параличей, когда остаточная биоэлектрическая активность усеченных или парализованных мышц естественным образом используется для управления движениями протеза или двигательного аппарата. При этом поверхностные или имплантированные электроды культы в результате электрической активности мышц формируют поступающие на усилитель электрические сигналы, что позволяет получать данные о виде совершаемого движения. Эти данные преобразуются в соответствующие управляющие сигналы исполнительных механизмов искусственной конечности. Поэтому для создания высококачественных протезов конечностей с био- и нейроэлектрическим управлением необходим качественный и стабильный сигнал.

Одним из главных недостатков всех известных способов электромиографического управления протезами является то, что сигналы деполяризации от стимулированных одновременно мышц накладываются и получить сигнал ЭМГ об активности конкретной мышцы достаточно проблематично. Влияние интерференционных помех от рядом расположенных мышц возрастает с ростом расстояния между измерительными электродами. Сигналы ЭМГ достоверно отражают начало мышечного сокращения, но не дают истинного представления о характере движения мышцы при сокращении. Не смотря на то, что сигнал ЭМГ один из самых простых электрофизиологических сигналов для измерения, но он же является одним из самых трудных для количественной оценки. Для точного распознавания движений по сигналам ЭМГ необходимо увеличивать количество электродных систем, накладываемых на мышцу, что иногда затруднительно, например, при больших уровнях ампутации конечностей [2].

На сегодняшний день современные бионические протезы имеют ряд недостатков и не могут заменить человеку утраченную конечность. Развитие современных технологий, методов исследований работы головного мозга и нервной системы, а так же применение наноматериалов не могут до конца решить вопрос об идеальном соединении нервной системы человека с механическим протезом.

Литература

1. Shehata, A. Improving internal model strength and performance of prosthetic hands using augmented feedback / A. Shehata, M. Controzzi, C. Cipriani // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* [Electronic resource]. – 2018. – Vol. 15, № 70. – 12 p.
2. Thesleff, A. Biomechanical Characterisation of Bone-anchored Implant Systems for Amputation Limb Prostheses: A Systematic Review / A. Thesleff, M. Ortiz-Catalan // *Annals of Biomedical Engineering*. – 2018. – Vol. 46, № 3. – P. 377–391.

УДК 620.178.152.32

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАРБИДОКРЕМНИЕВОЙ КЕРАМИКИ
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИОНОВ He И Kr**

Лапицкая В.А.^{1,2}, Хабарова А.В.¹, Холод В.М.³, Гринчук П.С.¹, Углов В.В.³, Чижик С.А.^{1,2}

¹Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси

²Белорусский национальный технический университет

³Белорусский государственный университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Методом наноиндентирования проведены исследования физико-механических свойств фаз SiC и Si образцов карбидокремниевой керамики до и после воздействия ионами гелия (He) и криптона (Kr). Облучение проводилось при интегральных дозировках He от $1 \cdot 10^{14}$ до $2 \cdot 10^{17}$ см⁻² и криптона – от $1 \cdot 10^{13}$ до $5 \cdot 10^{15}$ см⁻². Установлено, что модуль упругости E и микротвердость H фазы SiC керамики после воздействия излучения He и Kr снижаются относительно значений $E = 366 \pm 4$ ГПа и $H = 47,2 \pm 0,4$ ГПа исходного образца. Модуль упругости уменьшается с увеличением дозы He до 249 ± 3 ГПа и с увеличением дозы Kr – до 274 ± 3 ГПа. При максимальных дозах He и Kr микротвердость SiC и Si снижается.

Ключевые слова: керамика Si-SiC, ионы, излучение, физико-механические свойства, наноиндентирование.

**PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SILICON CARBIDE CERAMICS UNDER THE
INFLUENCE OF He AND Kr IONS**

Lapitskaya V.^{1,2}, Khabarava A.¹, Kholod V.M.³, Grinchuk P.S.¹, Uglov V.V.³, Chizhik S.^{1,2}

¹A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus

²Belarusian National Technical University

³Belarus State University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The physical and mechanical properties of the SiC and Si phases of silicon carbide ceramic samples before and after exposure to helium (He) and krypton (Kr) ions were studied by nanoindentation. Irradiation was carried out at integral dosages of He from $1 \cdot 10^{14}$ to $2 \cdot 10^{17}$ cm⁻² and krypton – from $1 \cdot 10^{13}$ to $5 \cdot 10^{15}$ cm⁻². It has been established that the elastic modulus E and microhardness H of the SiC ceramic phase after exposure to He and Kr radiation decrease relative to the values of $E = 366 \pm 4$ GPa and $H = 47.2 \pm 0.4$ GPa of the original sample. The elastic modulus decreases with increasing He dose to 24 ± 3 GPa and with increasing Kr dose – to 274 ± 3 GPa. At maximum doses of He and Kr, the microhardness of SiC and Si decreases.

Key words: Si-SiC ceramics, ions, radiation, physical and mechanical properties, nanoindentation.

Адрес для переписки: Лапицкая В.А., ул. П. Бровки, 15, г. Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: vasilinka.92@mail.ru

Введение. Карбид кремния (SiC) благодаря одновременному сочетанию высоких физико-механических и электропроводящих свойств [1–4], низкой теплопроводности, отличной износо- и коррозионной стойкости [2; 4], устойчивости к радиационному воздействию [5] является наиболее перспективным и предпочтительным материалом в космической отрасли и ядерной энергетике [6]. Способность выдерживать экстремальные ядерные условия привела к исследованию SiC как подходящего кандидата для реакторов и термоядерного синтеза. Однако, воздействие ионизирующего излучения может приводить к ухудшению механических и термических свойств, геометрии керамических материалов [5], что в результате может приводить к разрушениям. Целью работы является исследование влияния интегральной дозы излучения гелия и криптона на физико-механические свойства фаз (SiC и Si) карбидокремниевой керамики.

Материалы и методы. Образцы из карбидокремниевой керамики изготавливались методом реакционного спекания [7] в вакуумной печи при

следующих условиях: температура 1800 °С, абсолютное давление 0,13 Па, выдержка 2 ч. Затем заготовки проходили процесс силицирования, при котором в результате химической реакции кремния, присутствовавшего в избытке, с углеродом в порах каждой заготовки образовывался вторичный карбид кремния, связывающего частицы SiC исходного материала. Конечные образцы керамики содержали 93 об. % SiC и 5 об. % Si. Облучение ионами гелия (He) и криптона (Kr) проводилось при комнатной температуре. Энергия ионов He = 40 кэВ, Kr = 280 кэВ. Облучение проводилось на линейном ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60. Интегральные дозы гелия: $1 \cdot 10^{14}$, $1 \cdot 10^{15}$, $1 \cdot 10^{16}$, $5 \cdot 10^{16}$ и $2 \cdot 10^{17}$ см⁻², а криптона – $1 \cdot 10^{13}$, $1 \cdot 10^{14}$, $1 \cdot 10^{15}$ и $5 \cdot 10^{15}$ см⁻².

Физико-механические свойства (модуль упругости E и микротвердость H) определялись на наноинденторе 750 Ubi (Hysitron, США). Исследования проводились при нагрузке 5 мН. Модуль упругости исследуемого материала E пересчитывался по формуле (1) из полученных значений эффективного модуля упругости E_{eff} на наноинденторе [8]:

$$\frac{1}{E_{\text{eff}}} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_0^2}{E_0}, \quad (1)$$

где ν – коэффициент Пуассона исследуемого материала (для SiC $\nu = 0,18$, для Si $\nu = 0,22$) [9]; E_0 и ν_0 – модуль упругости и коэффициент Пуассона индентора (1140 ГПа и 0,07 соответственно).

Результаты. В результате облучения ионами He и Kr установлено, что значения модуля упругости (таблица 1) на фазе SiC уменьшаются с увеличением дозы облучения с 366 ± 4 ГПа до 249 ± 3 ГПа при воздействии He и с 366 ± 4 ГПа до 274 ± 3 ГПа при воздействии Kr, а на фазе Si – уменьшается с 181 ± 3 ГПа до 149 ± 3 ГПа при дозе He = $1 \cdot 10^{14}$ см⁻², а затем происходит возрастание до 156 ± 1 ГПа при дозе He = $5 \cdot 10^{16}$ см⁻². При дозе He = $2 \cdot 10^{17}$ см⁻² модуль упругости Si уменьшается до 154 ± 2 ГПа. При воздействии ионами Kr происходит аналогичное изменение модуля упругости для фазы Si как и при воздействии ионов He.

Таблица 1. Физико-механические свойства фаз SiC и Si в зависимости от интегральной дозы излучения гелия и криптона

Интегральная доза излучения, см ⁻²	Фаза SiC		Фаза Si		
	E , ГПа	H , ГПа	E , ГПа	H , ГПа	
He	0	366 ± 4	$47,2 \pm 0,4$	181 ± 3	$18,2 \pm 0,1$
	$1 \cdot 10^{14}$	354 ± 1	$49,2 \pm 0,3$	149 ± 3	$13,5 \pm 0,1$
	$1 \cdot 10^{15}$	341 ± 3	$49,1 \pm 1,4$	152 ± 1	$13,7 \pm 0,1$
	$1 \cdot 10^{16}$	342 ± 3	$52,5 \pm 0,6$	151 ± 2	$14,1 \pm 0,2$
	$5 \cdot 10^{16}$	271 ± 3	$30,2 \pm 0,3$	156 ± 1	$14,1 \pm 0,1$
	$2 \cdot 10^{17}$	249 ± 3	$25,2 \pm 0,4$	154 ± 2	$14,1 \pm 0,2$
Kr	0	366 ± 4	$47,2 \pm 0,4$	181 ± 3	$18,2 \pm 0,1$
	$1 \cdot 10^{13}$	394 ± 5	$56,7 \pm 3,5$	155 ± 3	$13,5 \pm 0,1$
	$1 \cdot 10^{14}$	367 ± 6	$53,7 \pm 1,3$	158 ± 2	$13,5 \pm 0,1$
	$1 \cdot 10^{15}$	284 ± 1	$30,0 \pm 0,3$	168 ± 5	$12,1 \pm 0,1$
	$5 \cdot 10^{15}$	274 ± 3	$29,1 \pm 0,6$	160 ± 5	$12,2 \pm 0,1$

Микротвердость H возрастает на фазе SiC после облучения He при дозах $1 \cdot 10^{14}$ – $1 \cdot 10^{16}$ см⁻², а при дальнейшем увеличении дозы значения микротвердости уменьшаются. На фазе Si происходит сначала снижение H (при $1 \cdot 10^{14}$ – $1 \cdot 10^{16}$ см⁻²), а затем увеличение. Ионы Kr приводят к снижению H для фазы Si. Микротвердость фазы SiC после воздействия Kr в дозах от $1 \cdot 10^{13}$ до $1 \cdot 10^{15}$ см⁻² возрастает с $47,2 \pm 0,4$ до $56,7 \pm 3,5$ ГПа, а при

дальнейшем увеличении дозировки – уменьшается до $29,1 \pm 0,6$ ГПа.

Закключение. Методом наноиндентирования проведены исследования физико-механических свойств фаз SiC и Si образцов карбидокремниевой керамики до и после воздействия ионами гелия и криптона. Модуль упругости E и микротвердость H фазы SiC керамики после воздействия излучения He и Kr снижаются относительно значений $E = 366 \pm 4$ ГПа и $H = 47,2 \pm 0,4$ ГПа исходного образца. Модуль упругости уменьшается с увеличением дозы He до 249 ± 3 ГПа и с увеличением дозы Kr – до 274 ± 3 ГПа. При максимальных дозах He и Kr микротвердость SiC и Si снижается. На фазе Si происходит сначала снижение H (при $1 \cdot 10^{14}$ – $1 \cdot 10^{16}$ см⁻²), а затем увеличение. Ионы Kr приводят к снижению H для фазы Si.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке ГПНИ, задание Энергетические и ядерные процессы и технологии 2.3.

Литература

1. Lim, K.Y. Mechanical properties of electrically conductive silicon carbide ceramics / K.Y. Lim, Y.-W. Kim, K.J. Kim / Ceramics International. – 2014. – Vol. 40. – P. 10577–10582.
2. Kima, Y.-W. Effects of carbon and silicon on electrical, thermal, and mechanical properties of porous silicon carbide ceramics / Y.-W. Kim, I.-H. Song, K.J. Kim // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46. – P. 15594–15603.
3. Characterization of hardness, elastic modulus and fracture toughness of RB-SiC ceramics at elevated temperature by Vickers test / X. Rao [et al.] // Materials Science & Engineering A. – 2019. – Vol. 744. – P. 426–435.
4. Material removal mode and friction behaviour of RB-SiC ceramics during scratching at elevated temperatures / X. Rao [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. – 2019. – Vol. 39. – P. 3534–3545.
5. Helium irradiation induced microstructural damages and mechanical response of Al₂O₃-ZrO₂-SiC composites / Y. Zhu [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. – 2023. – V. 43, is. 8. – P. 3475–3485.
6. Characterization of thermal sprayed Si on sintered SiC for space optical applications / T.D.P.V. Jalluri [et al.] // Surface Engineering. – 2021. – Vol. 37. – P. 558–571.
7. Advanced technology for fabrication of reaction-bonded SiC with controlled composition and properties / P.S. Grinchuk [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. – 2021. – Vol. 41. – P. 5813–5824.
8. 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 // Journal of Materials Research. – 1992. – Vol. 7. – P. 1564–1583.
9. Determination of Elastic Modulus of SiC-Based Composite Ceramics / M.V. Kiyashko [et al.] // Technical Physics Letters. – 2021. – Vol. 47. – P. 150–153.

УДК 620.186, 620.178.152.32

СТРУКТУРА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК Ni-Pt-V НА КРЕМНИИ ПОСЛЕ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Трухан Р.Э.¹, Лапицкая В.А.^{1,2}, Хабарова А.В.¹, Соловьёв Я.А.¹, Чижик С.А.^{1,2}

¹Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Методами атомно-силовой микроскопии и наноиндентирования исследованы морфология и физико-механические свойства пленок Ni-Pt-V толщиной 40 нм на кремнии после воздействия быстрой термической обработки (БТО). Структура поверхности пленки после 350 °С состоит из зерен размером 11,81–17,77 нм, образующих конгломераты. Размер конгломератов уменьшается при увеличении температуры БТО, а границы между ними становятся менее четкими. Самая низкая шероховатость наблюдается при температуре 350 °С. Удельная поверхностная энергия пленки растет с повышением температуры БТО. Увеличение температуры с 400 до 500 °С повышает модуль упругости и микротвердость в 3,4 раза.

Ключевые слова: пленка Ni-Pt-V, магнетронное распыление, быстрая термическая обработка, морфология поверхности, физико-механические свойства.

STRUCTURE AND PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF Ni-Pt-V FILMS ON SILICON AFTER RAPID THERMAL ANNEALING

Trukhan R.¹, Lapitskaya V.¹, Khabarava A.¹, Solovjov J.², Chizhik S.¹

¹A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus

²JSC "INTEGRAL" – "INTEGRAL" Holding Managing Company

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The morphology and physical and mechanical properties of 40 nm thick Ni-Pt-V films on silicon after rapid thermal annealing (RTA) were studied by atomic force microscopy and nanoindentation techniques. The film surface structure after 350 °C is grains with a size of 11.81–17.77 nm, forming conglomerates. The conglomerates size decreases with RTA temperature increasing, and the boundaries between them become less clear. The lowest roughness is observed at a temperature of 350 °C. The film specific surface energy increases with increasing RTA temperature. Increasing the temperature from 400 to 500 °C increases the elastic modulus and microhardness by 3.4 times.

Key words: Ni-Pt-V film, magnetron sputtering, rapid thermal annealing, surface morphology, physical and mechanical properties.

Адрес для переписки: Трухан Р.Э., ул. П. Бровки, 15, г. Минск, 220072, Республика Беларусь

e-mail: ruslan.trukhan@mail.ru

Введение. Тонкие пленки силицидов на основе никель-платиновых сплавов применяются в КМОП-технологии для создания полицидных затворов и контактов к истокам-стокам транзисторов, а также для создания диодов Шоттки [1; 2]. Формирование таких пленок проводится путем термической обработки никель-платиновой пленки на кремниевых пластинах. Для нанесения пленки Ni-Pt магнетронным распылением в состав мишени вводится ванадий, который переводит сплав Ni-Pt в парамагнитное состояние [2].

Быстрая термическая обработка вызывает структурные изменения пленки [3], которые влияют как на электрофизические свойства, так и на морфологию и физико-механические свойства пленки. Целью работы является исследование морфологии и определение физико-механических свойств пленок Ni-Pt-V на кремнии после воздействия БТО.

Материалы и методы. Пленки Ni-Pt-V толщиной 40 нм наносили методом магнетронного распыления 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 на установке 01НИ-7-015 (НИИ точного машиностроения, Россия). В качестве подложки использовали пластину монокристаллического кремния р-типа с удельным сопротивлением 0,005 Ом·см и ориентацией (111).

Пленки никеля на кремнии подвергали быстрой термической обработке в режиме теплового баланса на установке JetFirst 100 (Jipelec Qualiflow, France). Обратные стороны подложек облучались некогерентным световым потоком кварцевых галогенных ламп постоянной мощности в среде азота в течение 7 с. Нагрев проводился до температур от 350 до 500 °С [2].

Исследование морфологии и шероховатости, а также определение силы адгезии поверхности пленок проводилось на атомно-силовом микроскопе Dimension FastScan (Bruker, США) в режиме Peak Force QNM на полях 5×5 мкм². Использовались кремниевые кантилеверы типа CSG10_SS (TipsNano, Россия) с жесткостью

консоли 0,5 Н/м и радиусом острия 5 нм. Удельная поверхностная энергия определялась как отношение силы адгезии к радиусу острия зонда.

Физико-механические свойства (модуль упругости E и микротвердость H) определялись на наноинденторе 750 Ubi (Hysitron, США). Для определения свойств проводилось 9 индентирований при нагрузках до 100 мкН, соответствующих глубине индентирования менее 10 % от толщины пленки.

Результаты. Быстрая термическая обработка поверхности Ni-Pt-V пленок при разной температуре приводит к изменению морфологии поверхности (рисунок 1). При БТО 350 °С (рисунок 1, а) поверхность пленки состоит из зерен размером 11,87–17,77 нм, объединенных в конгломераты размером 69,59 – 483,54 нм. Повышение температуры до 450 °С (рисунок 1, в) – уменьшает размеры конгломератов до 51,68–167,07 нм. При температуре обработки 500 °С размер конгломератов увеличивается относительно температуры 450 °С, а их границы становятся менее четкими.

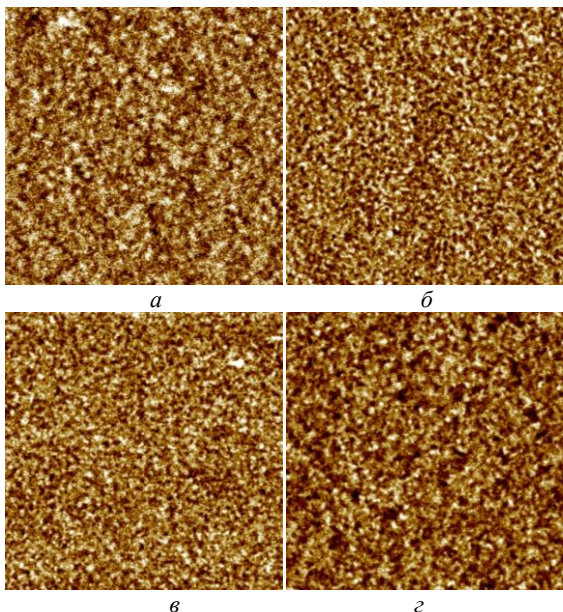


Рисунок 1 – АСМ изображения (5×5 мкм) поверхности Ni-Pt-V пленок на кремнии после БТО при: а – 350 °С; б – 400 °С; в – 450 °С; з – 500 °С

На поле 5×5 мкм² шероховатость пленки увеличивается с повышением температуры БТО с 350 °С до 450 °С (таблица 1). При 450 °С параметр R_z снижается до 1,00±0,05 нм, а R_a и R_q увеличивается до 3,42±0,17 нм и 4,13±0,21 нм относительно температуры 400 °С. Увеличение температуры до 500 °С снижает шероховатость пленки. Самая низкая шероховатость наблюдается при температуре 350 °С и составляет $R_a = 1,99±0,1$ нм, $R_q = 2,35±0,12$ нм и $R_z = 0,80±0,04$ нм. Удельная поверхностная энергия растет при повышении температуры с 0,071 Н/м при 350 °С до 0,079 Н/м при 500 °С.

Модуль упругости и микротвердость пленки Ni-Pt-V снижаются с 196±13 ГПа и 6,8±0,8 ГПа

при 350 °С до 123±4 ГПа и 6,1±0,6 ГПа при 400 °С соответственно. Дальнейшее повышение температуры БТО до 500 °С увеличивает E и H в 3,4 раза до 420±55 ГПа и 21,0±9,5 ГПа соответственно.

Таблица 1. Шероховатость и удельная поверхностная энергия пленок Ni-Pt-V при разных температурах БТО

T , °С	R_a , нм	R_q , нм	R_z , нм	γ , Н/м
350	1,99±0,1	2,35±0,12	0,80±0,04	0,071
400	3,23±0,16	4,02±0,20	1,21±0,06	0,076
450	3,42±0,17	4,13±0,21	1,00±0,05	0,077
500	2,56±0,13	3,12±0,16	0,98±0,05	0,079

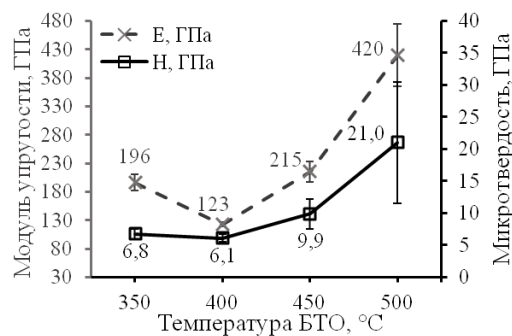


Рисунок 2 – Физико-механические свойства пленок Ni-Pt-V на кремнии после БТО

Заключение. Проведены исследования морфологии поверхности и физико-механических свойств Ni-Pt-V пленок на кремнии после БТО. Структура пленки состоит из зерен, образующих конгломераты, у которых, с увеличением температуры БТО до 500 °С границы становятся менее четкими. Самая низкая шероховатость $R_a = 1,99±0,1$ нм, $R_q = 2,35±0,12$ нм и $R_z = 0,80±0,04$ нм наблюдается при температуре 350 °С. Удельная поверхностная энергия увеличивается при повышении температуры БТО. Модуль упругости и микротвердость имеют самые низкие значения при температуре 400 °С и увеличиваются при повышении температуры до 500 °С

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № T23MЭ-010).

Литература

1. Формирование никель-платинового силицидного слоя в качестве барьерного для диода Шоттки / П.В. Кучинский [и др.] // Электрические контакты и электроды. – 2014. – С. 211–219.
2. Соловьёв, Я.А. Получение барьеров Шоттки быстрой термообработкой пленок сплава никель-платина-ванадий на кремнии / Я.А. Соловьёв, В.А. Пилипенко // Современные информационные и электронные технологии : материалы 21 междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 25–29 мая 2020 года / Политехперіодика. – Одесса, 2020. – С. 88–89.
3. Properties of CrSi₂ Layers Obtained by Rapid Heat Treatment of Cr Film on Silicon / T. Kuznetsova [et al.] // Nanomaterials. – 2021. – Vol. 11. – P. 1734.

УДК 621.317.39.084.2

ДВУХСЕНСОРНАЯ ГАЗОВАЯ МИКРОСИСТЕМА НА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЕ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Таратын И.А.¹, Реутская О.Г.¹, Горох Г.Г.², Федосенко В.С.²

¹Белорусский национальный технический университет,

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены результаты исследований электрофизических свойств и функциональных характеристик микросенсоров с металлоксидными газочувствительными слоями, изготовленных на подложках из нанопористого анодного оксида алюминия и тонких мембранах. Представленные результаты показали реальную перспективность изготовления маломощных тонкопленочных микросистем на нанопористых профилированных подложках для газоанализа, состоящих из нескольких микро-мощных сенсоров, которые обеспечивают регистрацию низких концентраций нескольких горючих или токсичных газов.

Ключевые слова: сенсорная микросистема, нанопористая подложка, вольтамперные характеристики.

DUAL-SENSORY GAS MICROSYSTEM ON NANOSTRUCTURED PLATFORM FOR ENVIRONMENTAL MONITORING

Taratyn I.A.¹, Gorokh G.G.², Reutskaya O.G.¹, Fedosenko V.S.²

¹Belarusian National Technical University

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

Abstract. The results of the electrical properties and functional characteristics studies of microsensors with metal oxide gas-sensitive layers manufactured on nanoporous alumina substrates and thin membranes are presented. The obtained results showed the real promise of low-power thin-film microsystems manufacturing on nano-porous profiled substrates for gas analysis, consisting of several micro-power sensors that provide registration of low concentrations of several flammable or toxic gases.

Key words: sensor microsystem, nanoporous substrate, current-voltage characteristics.

Адрес для переписки: Горох Г.Г., ул. П.Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
e-mail: gorokh@bsuir.by

Современные промышленно выпускаемые и разрабатываемые сенсорные устройства, используемые для контроля и мониторинга технологических газовых сред и сложных составов в ограниченном пространстве, имеют ряд конструктивных и технологических недостатков. Среди нерешенных проблем в них – повышение чувствительности газовых слоев без ущерба к селективности газовых составляющих в смеси газа; повышение термомеханических свойств применяемых слоев, позволяющие работать устройствам при повышенных температурах до 500–600 °С, снижение энергопотребления до микроватного диапазона при непрерывном режиме работы [1].

В настоящей работе предлагается к рассмотрению два варианта двухсенсорной газовой микросистемы: на наноструктурированной платформе из анодного оксида алюминия (АОА) либо мембране с пленкой АОА. Конструктивно первый вариант микросистемы представляет собой кристалл из анодного оксида алюминия толщиной 55–60 мкм с порами диаметром 50 нм. На планарной стороне кристалла сформированы по две пары платиновых информационных электродов, между которыми нанесены чувствительные слои, представляющие собой наноструктурированные металлооксидные пленки толщиной 150–400 нм.

На обратной стороне кристаллов сформированы нагревательные элементы в форме меандра. На рисунке 1 представлены внешний вид информационных электродов и нагревательных элементов данной конструкции. Принцип работы двухсенсорной газовой микросистемы основан на изменении электрофизических характеристик, нагретых металлооксидных чувствительных слоев при их взаимодействии с газовой средой. На одном чипе могут располагаться как сенсоры, газочувствительные слои которых работают параллельно и определяют один газ, так и сенсоры с газочувствительными слоями, работающими последовательно и определяющими газы разного состава. Сенсоры разработанной микросистемы калибруются на определенные концентрации следующих газов или их смесей: этанол, СО, Н₂, С₃Н₈, NO₂, NH₃. Рабочая температура газочувствительного слоя (In₂O₃+Al₂O₃+Pt) составляет от 200 до 450 °С, потребляемая мощность – 60 мВт.

Второй вариант двухсенсорной газовой микросистемы представляет собой тонкую мембрану подложке из анодного оксида алюминия, изготовленной по методике, подробно описанной в работе [2]. На лицевой стороне мембраны расположены платиновый нагреватель, в виде распределенного меандра по трем сторонам

мембраны, а в центре мембраны – встречно-штыревой конденсатор с тонким газочувствительным слоем. Конструкция второго варианта микросистемы представлена на рисунке 2.

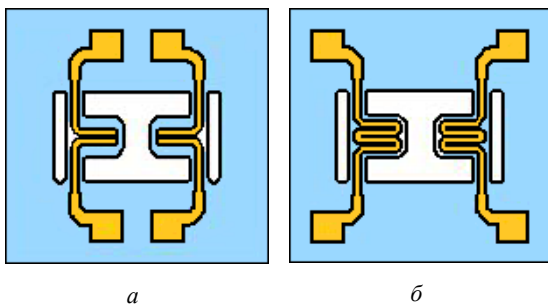


Рисунок 1 – Конструкция микросистемы на нанопористой подложке: *a* – информационные электроды; *б* – нагревательные элементы

Особенностью данной микросистемы является то, что в конструкции кристалла использована нанопористая основа, изготовленная по разработанной технологии микро-машининга (micro-machining) АОА, не имеющая аналогов в мире. Предложенный технологический подход позволил решить сразу несколько технологических и конструктивных проблем тонкопленочных хеморезистивных сенсоров, и одновременно повысить их функциональные характеристики.

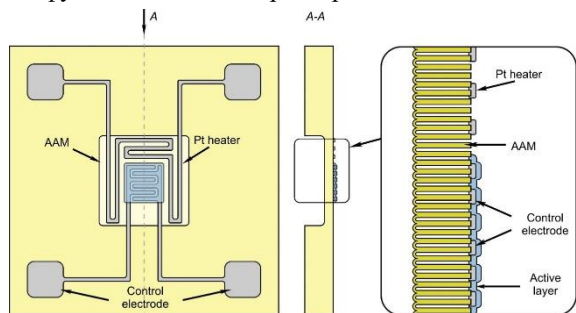


Рисунок 2 – Первый вариант топологии нагревателя сенсора на двухслойной мембране

Газочувствительные слои, состав которых определяется типом анализируемого газа, нанесенные на нанопористую поверхность АОО имеют в десятки раз большую эффективную поверхность, нежели на гладкой кремниевой или стеклянной поверхности, что позволило значительно повысить чувствительность сенсоров одновременно при уменьшении их геометрических размеров. Развитая пористая поверхность значительно улучшила тепломеханические характеристики микросистемы: повысилась адгезия платиновых электродов, уменьшилась теплопроводность несущей основы, тепло, выделяемое нагревателем, локализуется непосредственно в области чувствительного слоя, что в совокупно-

сти привело к значительному уменьшению тепловых потерь, повышению скорости реакции и регенерации датчика, увеличение толщины нагревателя и как следствие повышение надежности работы сенсора в целом. Вместе с тем структурированная поверхность подложки с одинаковыми порами позволила также наноструктурировать нанесенные на нее активные газочувствительные слои, в результате чего пленка представляет собой однородную систему равноразмерных зерен определенного состава, что позволило повысить селективность сенсоров. Микро-машининг подложки, создание на подложке толщиной 50–60 мкм мембран размером 100×100 мкм с толщиной 10–20 мкм, позволило локализовать тепло в ограниченной области мембраны, значительно снизить энергопотребление до десятков микроватт, повысить быстродействие до десятков секунд и скорость регенерации до единиц минут. Так, например, сенсоры, чувствительные к NO₂, характеризуются уровнем энергопотребления не выше 15 мВт, диапазоном измерения концентраций от 10⁻⁶ до 100 %, рабочей температурой до 350 °С; а предел чувствительности по CO ≥ 10 ppm при потребляемой мощности ≤ 10 мВт. Такие параметры практически не достигаемы для большинства выпускаемых сенсоров в РФ и за рубежом.

Использование нанопористого АОО в качестве пассивной диэлектрической подложки или мембраны позволяет обеспечить: быстродействие, малое энергопотребление, чувствительность к предельным концентрациям токсичных газов; минимизированные тепловые потери за счет конструкции сенсоров; согласованность термомеханических свойств используемых материалов; одновременное формирование на одном кристалле микросистемы нескольких сенсоров различных типов при сохранении размеров однокристалльной структуры, что позволяет проводить распознавание состава многокомпонентных газовых сред.

Микросистема может использоваться в противопожарных извещателях; в системах анализа многокомпонентных газовых сред, мониторинга окружающей среды, контроля рабочей среды промышленных предприятий.

Литература

1. Korotcenkov, G. Current Trends in Nanomaterials for Metal Oxide-Based Conductometric Gas Sensors: Advantages and Limitations. Part 1: 1D and 2D Nanostructures / G. Korotcenkov // *Nanomaterials*. – 2020. – № 10. – P. 1392.
2. A Micropowered Chemoresistive Sensor Based on a Thin Alumina Nanoporous Membrane and SnxBiKMoYz Nanocomposite. / G. Gorokh [et al.] // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22. – P. 3640–3657.

УДК 621.2.082.18, 620.178.143

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ ПОКРЫТИЙ Zr(C)N

Хабарова А.В.¹, Лапицкая В.А.^{1,2}, Кузнецова Т.А.^{1,2}, Вахолинский Б.³, Чижик С.А.^{1,2}, Гилевич А.³

¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

³Кошалинский технологический университет

Кошалин, Польша

Аннотация. Методом наноцарапания определен критический коэффициент интенсивности напряжений (K_{IC}) покрытий Zr(C)N. Покрытия осаждены на стальную подложку магнетронным методом при различной скорости потока ацетилена (от 0 до 6 см³/мин). Увеличение скорости потока ацетилена в камере от 0 до 1,5 см³/мин приводит к повышению критического коэффициента интенсивности напряжений на 18 %. Дальнейшее увеличение потока ацетилена до 6 см³/мин приводит к снижению критического коэффициента интенсивности напряжений, что коррелирует со снижающимися значениями физико-механических свойств и высокой шероховатостью поверхности.

Ключевые слова: покрытие Zr(C)N, магнетронное распыление, наноцарапины, коэффициент трения, критический коэффициент интенсивности напряжений.

ASSESSMENT OF STRENGTH PARAMETERS OF SURFACE Zr(C)N COATINGS

Khabarava A.V.¹, Lapitskaya V.A.^{1,2}, Kuznetsova T.A.^{1,2}, Warcholinski B.³,

Chizhik S.A.^{1,2}, Gilewicz A.³

¹A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

³Koszalin University of Technology

Koszalin, Poland

Abstract. The critical stress intensity factor (K_{IC}) of Zr(C)N coatings was determined using the nanoscratch method. The coatings are deposited onto a steel substrate using the magnetron method at different acetylene flow rates (from 0 to 6 cm³/min). Increasing the acetylene flow rate in the chamber from 0 to 1,5 cm³/min leads to an increase in the critical stress intensity factor by 18 %. A further increase in the acetylene flow to 6 cm³/min leads to a decrease in the critical stress intensity factor, which correlates with decreasing values of physical and mechanical properties and high surface roughness.

Key words: Zr(C)N coating, magnetron sputtering, nanoscratches, friction coefficient, critical stress intensity factor.

Адрес для переписки: Хабарова А.В., ул. П.Бровки, 15, г. Минск, 220072, Республика Беларусь

e-mail: AV.Khabarova@mail.ru

Введение. Покрытия ZrN имеют широкое практическое применение, поскольку представляют собой тугоплавкое соединение с хорошей химической и термической стабильностью, высокой твердостью и низким электрическим сопротивлением. Кроме того, в практическом применении, инструменты с покрытием ZrN показали значительные преимущества в производительности в сравнении с покрытием TiN во время испытаний на сверление [1].

Исследования покрытий ZrCN, нанесенных на стальную подложку методом магнетронного распыления, выявили высокие механические и трибологические характеристики [2], что является многообещающими результатами для возможности использования покрытий ZrCN в механических устройствах. Кроме того, покрытия ZrCN обладают хорошей биосовместимостью с организмом человека, что продемонстрировало их потенциал для медицинских устройств [3].

Сравнение характеристик ZrCN с более изученными покрытиями ZrN и ZrC [1–3],

поддерживая идентичные экспериментальные условия, является актуальной задачей.

Целью работы является исследование прочностных параметров покрытий Zr(C)N, нанесенных при различной скорости потока ацетилена ($P_{C_2H_2}$) в камере, методом наноцарапания.

Материалы и методы исследований. Покрытия Zr(C)N толщиной 3 мкм нанесены методом магнетронного распыления на установке TINA-900. В качестве подложки использованы круглые пластины из быстрорежущей стали P6M5 толщиной 4 мм и диаметром 32 мм. Параметры нанесения покрытий: напряжение смещения на подложке – минус 10 В, скорость потока азота (N_2) в камере оставалась постоянной и составляла 4 см³/мин, скорость потока ацетилена (C_2H_2) варьировалась от 0 до 6 см³/мин.

Наноцарапины на покрытиях Zr(C)N наносили на наноинденторе Hysitron 750 Ubi при помощи алмазного индентора (радиус закругления 226 нм). На каждом образце выполнялось по три

царапины длиной 5 мкм за 5 сек. Прикладываемая постоянная нагрузка составляла 1 мН.

Для интерпретации прочностных параметров покрытий используется два подхода – определение коэффициента трения $k_{тр}$ и расчет критического коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} [3] материала при нанозарапании.

Результаты исследований и обсуждения. Покрытия Zr(C)N, нанесенные при скорости потока ацетилена от 0 до 2 см³/мин, имеют высокие физико-механические свойства [4], ввиду чего проявляют лучшую стойкость к испытанию на царапание, малую глубину (до 5,2 нм) и ширину (до 19,5 нм) изношенной дорожки в сравнении с покрытиями ZrCN, нанесенными при большей скорости потока ацетилена – 3 и 6 см³/мин (глубина 8,8 и 16,2 нм, ширина 27,3 и 33,8 нм соответственно).

При проведении нанозарапания происходит непрерывная фиксация значений $k_{тр}$. Испытания на покрытиях Zr(C)N показали возрастание коэффициента трения от $0,068 \pm 0,027$ до $0,093 \pm 0,034$ при увеличении скорости потока ацетилена от 0 до 2 см³/мин (рисунок 1). Скорость потока ацетилена 3 см³/мин приводит к снижению значения $k_{тр} = 0,071 \pm 0,012$, на которое повлияла также низкая шероховатость поверхности [4]. При $P_{C_2H_2} = 6$ см³/мин коэффициент трения составил $0,083 \pm 0,02$.

0 см³/мин – $0,072 \pm 0,021$ 1 см³/мин – $0,068 \pm 0,027$ 1,5 см³/мин – $0,072 \pm 0,039$
2 см³/мин – $0,093 \pm 0,034$ 3 см³/мин – $0,071 \pm 0,012$ 6 см³/мин – $0,083 \pm 0,02$

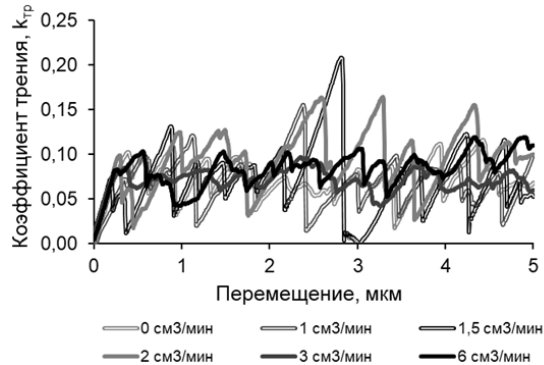


Рисунок 1 – Коэффициент трения $k_{тр}$ при нанозарапании покрытий Zr(C)N, нанесенных при различной скорости потока ацетилена

Расчет критического коэффициента интенсивности напряжений покрытий Zr(C)N на основе испытаний на нанозарапание (рисунок 2) показал, что повышение скорости потока ацетилена в камере от 0 до 1,5 см³/мин приводит к возрастанию значений критического коэффициента интенсивности напряжений на 18 % – от 327,85 до 386,76 МПа·м^{1/2}. Поток ацетилена в камере 2 и 3 см³/мин

способствует снижению K_{IC} до 277,65 и 151,88 МПа·м^{1/2} соответственно. Самое малое значение $K_{IC} = 90,65$ МПа·м^{1/2} получено у покрытия ZrC, нанесенного при скорости потока ацетилена 6 см³/мин, что связано в том числе с наличием на поверхности крупных кристаллитов, которые могут препятствовать растрескиванию и дальнейшей декогезии (отслаиванию) покрытия, возникающей при больших деформациях [5].

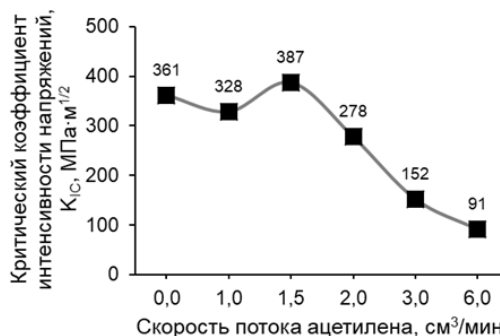


Рисунок 2 – Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} при нанозарапании покрытий Zr(C)N, нанесенных при различной скорости потока ацетилена

Установлено, что лучшими прочностными параметрами обладает покрытие ZrCN, нанесенное при скорости потока ацетилена 1,5 см³/мин – $k_{тр} = 0,072 \pm 0,039$ и $K_{IC} = 386,76$ МПа·м^{1/2}.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (гранты № Ф22М-006 и № Т21МС-029).

Литература

1. Microstructure and mechanical properties evaluation of cathodic arc deposited CrCN/ZrCN multilayer coatings / S.H. Huang [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2005. – Vol. 803. – P. 1005–1015.
2. Effect of Atmosphere During Deposition on the Morphology, Mechanical Properties and Microfriction of Zr-Based Coatings / T.A. Kuznetsova [et al.] // Advanced Materials Modelling for Mechanical, Medical and Biological Applications. Advanced Structured Materials. – 2021. – Vol. 155. – P. 271–319.
3. Effect of carbon content on nanostructural, mechanical and electrochemical characteristics of self-organized nc-ZrCN/a-CN_x nanocomposite films / F. Zhou [et al.] // Applied Surface Science. – 2015. – Vol. 327. – P. 350–357.
4. Ulm, F.J. The scratch test for strength and fracture toughness determination of oil well cements cured at high temperature and pressure / F.J. Ulm, S. James // Cement and Concrete Research. – 2011. – P. 942–946.
5. Changjin, X. Cracking and decohesion of a thin Al₂O₃ film on a ductile Al–5%Mg substrate / X. Changjin, T. Wei // Acta Materialia. – 2005. – Vol. 53. – P. 477–485.

УДК 621.382

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ GAN-ПРИБОРОВ**Литвинова А.В., Ефименко С.А.***Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Сегодня приборы на основе нитрида галлия находят широкое применение в силовой электронике. Рассмотрены базовые технологические процессы создания приборов на основе GaN: начиная с эпитаксии и заканчивая сборкой.

Ключевые слова: нитрид галлия, эпитаксиальное наращивание, изоляция приборов, литография, сборка.

FEATURES OF THE MANUFACTURING TECHNOLOGY OF GAN DEVICES**Litvinova A.V., Efimenko S.A.***Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Today, devices based on gallium nitride are widely used in power electronics. The basic technological processes of creating devices based on GaN are considered: starting with epitaxy and ending with assembly.

Keywords: gallium nitride, epitaxial buildup, isolation of devices, lithography, assembly.

*Адрес для переписки: Литвинова А.В., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: litvinovanna2410@gmail.com*

GaN-приборы (сокращение от Gallium Nitride) – это полупроводниковые устройства, которые используют соединение галлия с азотом (GaN) в качестве активного материала. Они являются альтернативой традиционным приборам на основе кремния.

По сравнению с традиционной кремниевой технологией при формировании GaN-структур становятся практически недоступными такие базовые технологические операции, как диффузия примесей и окисление. Проблема диффузионного легирования связана с низкими коэффициентами диффузии в GaN таких основных примесей, как алюминий, магний и кремний. Данная проблема также усугубляется максимально допустимой температурой процессов.

Кроме того, имеет ряд ограничений процесс ионного легирования структур, поскольку даже при максимально допустимой температуре процессов 1250 °С не может быть получена полная активация имплантированной примеси.

Таким образом, основным способом формирования легированных GaN-структур является послойное эпитаксиальное наращивание [1].

Эпитаксия. Наибольшее распространение в настоящее время в качестве материала подложек нитридной эпитаксии получили сапфир (Al_2O_3), карбид кремния (SiC) и кремний (Si) [2]. Наилучшей теплопроводностью и наименьшим значением рассогласования постоянных решеток с GaN обладает SiC, однако качественные подложки из этого материала имеют высокую стоимость.

Самыми распространенными способами роста эпитаксиальных структур на основе GaN являются металлоорганическая газофазная эпитаксия (МОГФЭ) и молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ). В основе процесса роста методом МОГФЭ лежит протекание реакции взаимодействия триметил- или триэтилгаллия (алюминия,

индия) с аммиаком. Особенностью роста методом МОГФЭ являются относительно высокое давление в реакторе (до 1 атм.) и высокая температура подложки (1000–1100 °С), которая необходима для эффективного разложения аммиака. Высокое давление газов-прекурсоров в ростовой камере позволяет осуществлять рост на относительно высокой скорости (до нескольких мкм/час). Считается, что высокая температура роста МОГФЭ позволяет добиться высокого структурного качества за счет обеспечения высокой подвижности адатомов на растущей поверхности.

Изоляция приборов. Является одним из первых процессов при формировании структуры, важность которого возрастает с увеличением обратного напряжения. Для решения данной задачи могут использоваться две технологии – травление мезаструктур и ионная имплантация. Мезаструктуры обеспечивают электрическую изоляцию соседних структур на общей подложке. Их травление, как правило, осуществляют методом реактивного ионного травления (РИТ) с индуктивно-связанной плазмой (ИСП) Cl_2 или BCl_3 . Ионная имплантация позволяет осуществить изоляцию методами планарной технологии. С этой целью в поверхность GaN внедряют ионы He^+ , H^+ или N^+ , что увеличивает удельное сопротивление полупроводника до 10^{10} Ом·см. Эффективному восстановлению кристаллической структуры GaN способствует отжиг в газообразном аммиаке или азоте.

Формирование контактов. В качестве омических контактов к n-GaN применяют многослойные структуры типа Ti/Al/Au, Ti/Al/Ni/Au, которые после быстрого термического отжига (БТО) при температуре более 850 °С имеют контактное сопротивление менее 10^{-4} Ом·см². Для контактов к p-GaN целесообразно использовать многослойную структуру типа Ni/Au, которая после БТО при

температуре 600 °С имеет контактное сопротивление менее 10^{-3} Ом·см². Для снижения контактных сопротивлений также можно применять ионную имплантацию примесей в контактные окна перед нанесением металлизации. Для n-GaN это может быть имплантация кремния дозой порядка $5 \cdot 10^{14}$ см⁻² и энергией 180–250 кэВ с постимплантационной БТО при температурах от 700 до 1100 °С [3]. Подлегирирование контактов для p-GaN менее эффективно по сравнению с n-типом.

Наиболее популярным материалом для затвора Шоттки является многослойная структура типа Ni/Au, а для высокотемпературных операций наилучшим образом подходят многослойные структуры на основе Ig или W.

Литография. Литография является базовым процессом для любого полупроводникового прибора. Фотолитография используется для формирования контактов омических и затворных контактов.

Травление и процессы изготовления канавок. «Мокрое» травление позволяет избежать повреждений структуры полупроводника в процессе. Воспроизводимость «мокрого» травления управляется в основном транспортом реактивов в травителе и очень сильно зависит от геометрии процесса и ряда других факторов. «Сухое» травление GaN-структур является основной технологией формирования рисунка, поскольку «мокрые» процессы травления неэффективны для данных целей.

Формирование поверхности и пассивация прибора. Технология формирования пассивации включает следующие этапы:

- 1) очистка поверхности, включая:
 - удаление материала;
 - модификацию морфологии поверхности;
- 2) предварительная обработка поверхности полупроводника, включая:
 - химическую реакцию на поверхности (например окисление);
 - физическое кондиционирование (например адсорбцию газов);
 - осаждение диэлектрика;
 - формирование многослойной структуры.

Обработка поверхности и условия очистки очень важны в течение всего процесса формирования структуры. Это обусловлено тем, что из-за полярной природы III-N-материалов состояние поверхности эпитаксиальных слоев является критически важным после извлечения из ростового реактора, когда структура подвергается естественному окислению и коррозии в воздушной среде. Для его предотвращения рекомендуется на

поверхности эпитаксиального слоя *in situ* выращивать защитный тонкий слой SiN.

Оптимизированный процесс осаждения пассивации нейтрализует статические и динамические поверхностные состояния, обусловленные обрывными связями на поверхности, адсорбированными ионами и зарядами остаточных материалов, например оксидов. Нитрид кремния является наиболее популярным материалом пассивации для III-N-полупроводников. Типовой эффект от данной пассивации выражается в увеличении выходной мощности, уменьшении эффектов частотной дисперсии и модификации токов утечки, приводящих, как правило, к снижению напряжения пробоя. В дальнейшем эти эффекты приводят к улучшению долговечности приборов. Оксидная пассивация на основе SiO₂ может служить альтернативой нитриду. Нанесение SiO₂ проводят плазмохимическим осаждением при температуре 150 °С в плазме O₂/He с моносиланом.

Сборка. Максимальная рабочая температура кремниевых микросхем и полупроводниковых приборов – 125–150 °С. Элементы на основе карбида кремния SiC и нитрида галлия GaN могут работать при температуре от 200 до 1000 °С. Однако для того, чтобы реализация этих возможностей происходила без ухудшения показателей надежности, необходимо внедрение соответствующих технологий корпусирования модулей, поиск новых интерфейсных материалов, отказ от традиционных технологий пайки кристаллов на плату или в корпус и ультразвуковой сварки выводов кристаллов. Данные процессы во многом определяют физические пределы плотности мощности и температурного диапазона силовых модулей. Одним из возможных кардинальных решений данной проблемы является внедрение компанией SEMIKRON процесса низкотемпературного спекания и разработка SKiN- технологии [1].

Литература

1. Основы силовой электроники / А.И. Белоус [и др.]. – М. : Техносфера, 2019. – 424 с.
2. Литвинова, А.В. Особенности силовых приборов на основе GAN / А.В. Литвинова, С.А. Ефименко // Материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения», БНТУ. – Минск, 2023. – С. 149–150.
3. Юник, А.Д. Влияние температуры быстрого термического отжига на электрофизические свойства омического контакта металлизации Ti/Al/Ni к гетероструктуре GaN/AlGaN / А.Д. Юник, Я.А. Соловьёв, Д.В. Жигулин // Доклады БГУИР. – 2022. – № 20(3). – С. 13–19.

УДК 681.586

ДАТЧИКИ ДВИЖЕНИЯ

Люцко К.С., Крук А.Д.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Датчики движения – это устройства, используемые для обнаружения и записи движущихся объектов в окружающей среде. В работе рассмотрены основные виды датчиков движения: пьезоэлектрические, ультразвуковые, микроволновые и инфракрасные, их преимущества и принцип работы.
Ключевые слова: датчик движения, объект, устройство, датчик.

MOTION SENSORS

Liutsko K., Kruk A.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Motion sensors are devices used to detect and record moving objects in the environment. The paper discusses the main types of motion sensors: pyroelectric, ultrasonic, microwave and infrared, their advantages and operating principle.

Keywords: motion sensor, object, device, sensor.

Адрес для переписки: Люцко.К.С., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: liutsko@bntu.by

Датчик движения – это устройство, используемое для обнаружения и записи движущихся объектов в окружающей среде.

Основной функцией датчика движения является обнаружение изменений окружающей среды и границ при движении объектов.

Под термином «датчик движения» чаще всего, имеют в виду электронное инфракрасное устройство способное обнаружить присутствие и движение человека, одновременно контролируя питание электрических устройств. Иногда датчики движения ошибочно отождествляют с акселерометрами, но разница заключается в том, что акселерометры не способны регистрировать линейное равномерное движение, но могут определять ориентацию относительно вертикальной оси даже в состоянии покоя.

В зависимости от принципа работы выделяются следующие виды датчиков движения:

– пьезоэлектрический датчик (PIR) (рисунок 1). Данный вид датчиков движения использует в своей работе пьезоэлектрический эффект для обнаружения движения. Реагируют на изменение инфракрасного излучения, вызванного движущимися объектами. Состоят из пьезоэлектрического материала, генерирующего электрический сигнал при изменении теплового излучения в поле действия датчика. Широко используются в системах безопасности и автоматического освещения;

– микроволновой датчик. Эти датчики используют высокочастотные радиоволны для обнаружения движения. Они генерируют постоянный ток микроволновых сигналов и контролируют отраженные сигналы от движущихся объектов. При пересечении объектом зоны действия датчика и

изменении отраженного сигнала происходит регистрация движения. Используются в системах безопасности и автоматических дверях;

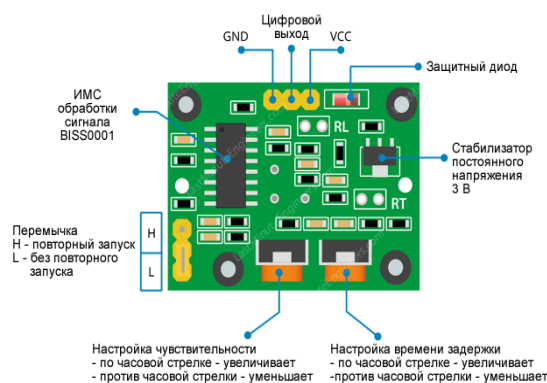


Рисунок 1 – Устройство PIR датчика

– ультразвуковой датчик (рисунок 2). В этих датчиках генерируемые Ультразвуковые волны генерируемые датчиком в последствие отражаются от объектов и фиксируются. Происходит анализ времени прохождения ультразвука и его изменения с целью обнаружения движущихся объектов. Используются в системах безопасности, парковочных системах и промышленности;



Рисунок 2 – Устройство ультразвукового датчика

– инфракрасный датчик. Обнаруживают изменения теплового излучения объектов. Работают на основе пироэлектрического эффекта или используют другие методы, например изменение температуры или интенсивности излучения. Используются в системах безопасности, автоматическом освещении и устройствах умного дома [1].

Каждый тип датчика движения имеет свои особенности и применение в зависимости от конкретных требований задачи. Пироэлектрические датчики хорошо подходят для обнаружения теплового излучения живых объектов, микроволновые датчики обладают высокой чувствительностью, ультразвуковые датчики применяются в парковочных системах, а инфракрасные датчики находят широкое применение в системах безопасности и умных домах.

Направления использования датчиков движения:

– лазерное сканирование – процесс использования лазерных лучей для обнаружения и измерения движения объектов в окружающей среде. В основе работы лазерного сканирования датчиков движения лежит скорость прохождения лазерного луча. Датчик посылает короткий импульс лазерного света и измеряет время, необходимое, для возвращения в первичную точку. Измерение времени позволяет определить расстояние до объекта. В современных системах лазерного сканирования используется особый вид датчиков, называемый лидаром (LIDAR – Light Detection and Ranging);

– видеоаналитика – обнаружение движущихся объектов в видеопотоке. Позволяет следить за объектом и автоматически уведомлять об изменении его положения или взаимодействия с другими

объектами. Видеоаналитика с использованием датчиков движения обеспечивает автоматизированную и эффективную обработку видеоданных, что помогает снизить нагрузку на операторов системы видеонаблюдения и обеспечивает более точное и быстрое обнаружение событий;

– радары – устройства измеряющие расстояние до объектов, определяющие их скорость и направление движения. Датчики движения используются в радарх для обнаружения и отслеживания движущихся объектов в окружающей среде. Работают в данном случае на основе эффекта Доплера (возникает при изменении частоты радиоволн, отраженных от движущихся объектов). Измерение изменения частоты позволяет определить скорость объекта относительно радара.

Преимуществами датчиков движения являются:

- повышение безопасности;
- экономия энергии;
- удобство и эффективность.

Датчики движения продолжают развиваться и находят применение во многих сферах. Их возможности постоянно расширяются, а цена и размеры снижаются, что делает их доступными для широкого использования. Будущее датчиков движения связано с их интеграцией в «умные» системы, где они будут играть ключевую роль в создании комфортной, безопасной и эффективной среды для жизненных и рабочих задач.

Литература

1. Котюк, А.Ф. Датчики в современных измерениях / А.Ф. Котюк. – М. : Радио и связь, 2006. – 571 с.

УДК 577.2.08

МУЛЬТИСЕНСОРНАЯ СИСТЕМА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ БИОАЭРОЗОЛЕЙ Люцко К.С.¹, Филатов С.А.²

¹Белорусский национальный технический университет

²Институт тепло-и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Описывается разработка мультисенсорной микропроцессорной системы детектирования биоаэрозолей с открытой архитектурой для мониторинга качества воздуха.

Ключевые слова: биосенсор, биоаэрозоли, мониторинг качества воздуха.

MULTISENSORY SYSTEM FOR DETECTION OF BIOAEROSOLS Liutsko K.S.¹, Filatov S.A.²

¹Belarusian National Technical University

²A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The development of a multisensor microprocessor-based bioaerosol detection system with an open architecture for air quality monitoring is described.

Key words: biosensor, bioaerosols, air quality monitoring.

Адрес для переписки: Люцко К.С., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: liutsko@bntu.by

В настоящее время прямое и косвенное радиационное воздействие аэрозолей на атмосферу признано основным источником неопределенности в моделировании глобального климата,

причем значительную роль играют аэрозоли как антропогенного происхождения (связанных со сжиганием ископаемого топлива, промышленных процессов, работой транспорта) так и естест-

венного происхождения (например, песок, пыльца, бактерии, а также частицы, выбрасываемые в результате эрозии почвы, песка, пожаров). Отдельную проблему представляют биологические аэрозоли, в том числе субмикронного размера, содержащие токсичные веществ. Системы дистанционного, спутникового зондирования, как правило не позволяют определить приземную концентрацию и состав таких аэрозолей, что делает актуальным разработку систем локального и мобильного мониторинга аэрозольного загрязнения атмосферы. Характеристика таких биоаэрозолей имеет важное значение для секторов охраны окружающей среды, общественного здравоохранения и безопасности. Разработка детекторов флуоресценции, индуцированной ультрафиолетовым излучением (UV-LIF), такие как широкополосный интегрированный биоаэрозольный спектрометр (WIBS) и многопараметрический спектрометр биологических аэрозолей (MBS), позволили в режиме реального времени проводить измерения флуоресценции для обнаружения патогенных частиц [1–5].

Целью настоящей работы является разработка сенсорной системы для обнаружения вредных и токсичных биологических аэрозолей а также неорганических аэрозольных частиц в воздухе и воде. Модульная структура системы с открытой архитектурой позволяет расширить диагностические возможности системы, как по оценке размеров частиц, так и по концентрации и типу обнаруживаемых аэрозолей. Система также может быть использована для обучения и верификации работы сенсорных систем других типов.

Решение проблем, связанных с мониторингом качества воздуха, обнаружением и детектированием биоаэрозолей, является сложной комплексной задачей, которая предполагает решение комплекса задач для построения оптимальной методики эксперимента, создания математических моделей, создания новых технических средств детектирования биоаэрозолей, методики проведения экспериментов и обработки экспериментальных данных (в том числе с использованием, разрабатываемых средств искусственного интеллекта на основе нейронных сетей). Важное значение имеет локализация проведения экспериментов в реальных климатических условиях и обучение системы в условиях фоновых воздействий и с учетом особенностей природных и техногенных аэрозолей.

Для обнаружения неорганических частиц в воздухе используется измерение рассеянного излучения непрерывного диодного лазера (660 нм). После обнаружения частиц размером до ~1 мкм импульсное УФ излучение 254, 280 нм и 365–370 нм используется для возбуждения биофлуорофоров триптофана и никотинамидадениндинуклеотида (например, E.coli, споры BG (*Bacillus atrophaeus*,

имитация спор *V. anthracis*)). Обнаружение флуоресценции возбуждаемой обеими импульсами свидетельствует о наличии биологической аэрозоли [1]. Ожидаемая скорость регистрации – до 200 частиц в секунду, что достаточно для обнаружения следовых концентраций аэрозольных частиц. Для генерации УФ излучения будут использоваться высокоэффективные лазерные диоды. Для регистрации флуоресценции в диапазоне 300–450 нм и 400–650 нм используются ФЭУ (могут быть использованы High Quantum Efficiency фотодиоды) с интерференционными фильтрами.

Отличительной особенностью установки является использование аэрозольного циклона для концентрирования аэрозольных частиц, а также возможность измерения лазерно-индуцированной флуоресценции отдельных частиц. Аэродинамическая и оптическая схема системы будет спроектирована и оптимизирована с помощью систем CAD, CAE, прототипирование системы выполнено с использованием 3D принтера, что позволяет осуществлять быструю адаптацию системы для решения задач. В отличие от известных систем FLAPS2 (Defence Research Establishment Suffield, Canada), WIBS2 и WIBS3 (Centre for Atmospheric Science, Manchester), разрабатываемая система имеет классическую схему (рисунок 1) детектирования флуоресценции аэрозольных частиц и модульную открытую архитектуру, что в перспективе позволит использовать спектральную информацию для автоматического (AI) распознавания типа аэрозольных частиц после обучения системы.

В прототипе сенсорной системы (рисунок 2), использованы модифицированные датчики аэрозольных частиц Plantower PMS5003 (рисунок 3) и микроконтроллер Arduino UNO.

Дополнительно к сенсору аэрозольных частиц (контроль твердых частиц: Pm10, Pm5, Pm2.5) в прототипе экспериментальной системы используются датчики CO, CO₂, NO_x, NH₃, SO₂, H₂S, O₃, что позволяет более точно верифицировать возможное происхождение биоаэрозолей.

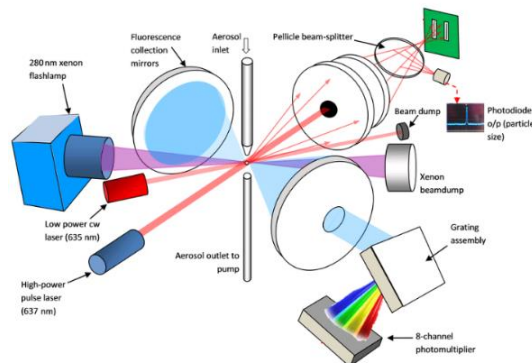


Рисунок 1 – Классическая» схема детектирования флуоресценции аэрозольных частиц [4]

Высокая чувствительность и относительная простота анализа делают лазерно-индуцированную флуоресценцию привлекательной как для аналитических целей, так и для задач технологического контроля, что позволяет обнаруживать вещества с низким квантовым выходом флуоресценции в концентрации 10^{-11} – 10^{-15} моль/л.



Рисунок 2 – Прототип установки для детектирования аэрозольных частиц в воздухе

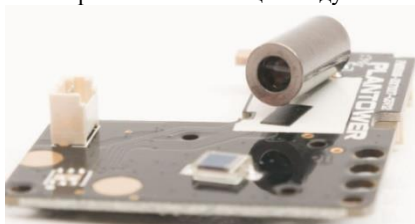


Рисунок 3 – Одноканальный датчик аэрозольных частиц Plantower PMS5003

Разработанная система найдет широкое применение для оценки биологических аэрозолей, как биогенного, так и техногенного происхождения, в системах безопасности и системах мониторинга качества воздуха. Исследование аэрозолей воздуха также станет основой для оптимизации моделей генерации аэрозолей и их роли в глобальных климатических процессах.

Литература

1. Bio-aerosol fluorescence sensor / F.L. Reyes [et al.] // *Field Anal. Chem. and Technol.* – 1999. – № 3 (4–5). – P. 240–248.
2. Single particle fluorescence spectrometer for ambient aerosols / Y-L Pan [et al.] // *Aerosol Sci. Tech.* – 2003. – № 37. – P. 628–639.
3. Kaye, P.H. A single-particle multichannel bioaerosol fluorescence sensor / P.H. Kaye, W.R. Stanley, E. Hirst // *Optics Express.* – Vol. 13, № 10. – P. 3583–3593.
4. Evaluation of machine learning algorithms for classification of primary biological aerosol using a new UV-LIF spectrometer / S. Ruske [et al.] // *Atmospheric Measurement Techniques.* – 2017. – № 10. – P. 695–708.
5. Systematic characterization and fluorescence threshold strategies for the wideband integrated bioaerosol sensor (WIBS) using size-resolved biological and interfering particles / Savage, N.J. [et al.]. – 2017.

УДК 621.455.4

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ В МИКРО- И НАНОТЕХНИКЕ

Подвицкий Н.В., Люцко К.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Целью работы является исследование устройства, назначения и типологии электромагнитных МЭМС-переключателей, теоретическое исследование проводилось методом анализа литературы и нормативных источников.

Ключевые слова: исследование, МЭМС, переключатель, датчик, актюатор, кантилевер.

ELECTROMAGNETIC SWITCHES IN MICRO- AND NANOTECHNOLOGY

Podvitskiy N.V., Liutsko K.

*¹Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The purpose of the work is to study the design, purpose and typology of electromagnetic MEMS switches, theoretical research was carried out by analyzing literature and regulatory sources.

Key words: research, MEMS, switch, sensor, actuator, cantilever.

*Адрес для переписки: Люцко. К.С., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: liutsko@bntu.by*

Микроэлектромеханическими системами (МЭМС) называют класс механических и электронных устройств размерами менее 100 мкм. В их числе встречаются датчики давления и температуры, акселерометры, кварцевые генераторы, биморфные актюаторы и прочие миниатюрные приборы. Зачастую ющейся в единицах фемтофарад. Переключатель с емкостными контактами является, по-сути, дискретно перестраиваемым

конденсатором, у которого отношение емкостей во включенном и выключенном состоянии $C_{вкл}/C_{выкл}$ может достигать 100 [1]. Переключатели такого типа характеризуются крайне малыми потерями на высоких частотах (0,1 дБ на 40 ГГц) и высокой линейностью (более 66 дБм). Управляющее напряжение, приложенное к переключателю с емкостными контактами, ниже по сравнению с резистивными ведь нет необходимости в

большом прижимном усилии актюатора для обеспечения низкого сопротивления контакта. Отметим, что требуется максимальная гладкость контактных поверхностей, ведь возможные зазоры между ними вызовут как уменьшение отношения $C_{\text{вкл}}/C_{\text{выкл}}$ в случае емкостного контакта, так и увеличение адгезии между слоями металла при контактах резистивного типа.

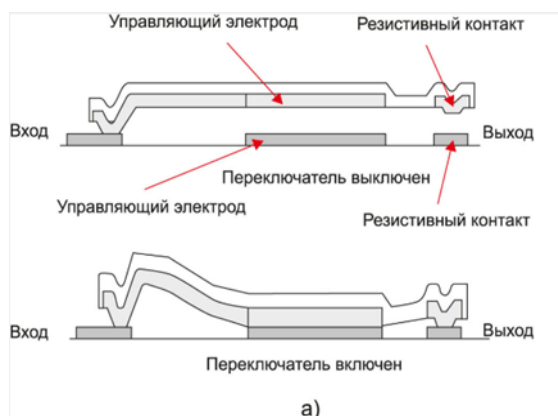


Рисунок 1 – Схема МЭМС-переключателя с резистивными контактами

В электромагнитных МЭМС-переключателях используются как емкостные, так и резистивные контакты. Ресурс, зависящий от переключаемой мощности, всегда был значительной проблемой для МЭМС-переключателей. В начале XXI века ресурс МЭМС-переключателей составлял всего десять циклов при токе 300 мА, тысячу циклов при токе 20 мА и десять миллиардов циклов при токе 2 мА [2]. Производители современных компонентов ограничивают 100 млрд циклов в «холодном» режиме и 1 млрд циклов при коммутационном токе 500 мА, что показывает, что МЭМС-переключатели работают долго в условиях большой подаваемой мощности. В этом случае заявленный ресурс МЭМС-переключателя обычно соответствует «холодному» режиму эксплуатации. Достоверно известно, что существенное снижение ресурса МЭМС-переключателя при увеличении мощности происходит вследствие микросварки контактов в момент их неплотного соединения. В результате этого контакты «слипаются», что означает, что переключатель не может их разомкнуть.

Для управления уровнем сигнала можно использовать схему ограничения на двух диодах. В момент срабатывания МЭМС-переключателя на диоды подается нулевое напряжение, в этом случае они ограничивают сигнал на уровне $\pm 0,5$ В. В остальное время, для предотвращения ограничения сигнала, диоды предполагается запирают напряжениями, превосходящими его максимальное и минимальное значения.

Исследователи из Университета Луизианы в Соединенных Штатах предложили идею биста-

бильного электромагнитного МЭМС-переключателя для мощных сигналов с низким напряжением управления в 2019 году [3]. В основе работы этого элемента лежит копланарный волновод. Однако контактные линии не закреплены на стеклянной подложке, а «подвешены» над ней и способны изгибаться (рисунок 2). Постоянный магнит под подложкой служит источником магнитного поля. При пропускании через актюаторы постоянного тока на них действует сила Лоренца, направление которой можно менять, реверсируя ток [1].

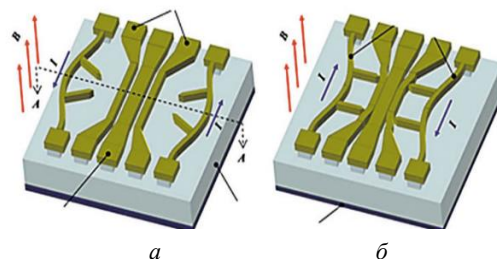


Рисунок 2 – МЭМС-переключатель с электромагнитным приводом и низким управляющим напряжением: а – включен; б – выключен

На рисунке 2, а переключатель находится во включенном состоянии, сигнал беспрепятственно проходит по волноводу. При реверсе тока, изображенном на рисунке 2, б, актюаторы толкают контактные линии к волноводу. Из-за изменения его волнового сопротивления большая часть высокочастотного сигнала отражается обратно к входу, что соответствует выключенному состоянию переключателя. Актюаторы же после срабатывания можно обесточить, ибо их положение фиксируется за счет сил упругости. Для предотвращения замыкания волновода и актюаторов на линии на боковую поверхность всех элементов переключателя наносится слой диэлектрика [1].

Разработчики элемента выделяют в числе его преимуществ следующие качества: МЭМС производят локальным вытравливанием кремниевых подложек и нанесением на них пленок из проводящих и диэлектрических материалов. Перспективным является использование метода электронно-лучевой литографии (ЭЛТ) при производстве МЭМС, так как малая длина волны у электрона дает возможность формирования на подложке достаточно сложных структур размером в единицы микрон, на базе которых создаются электромеханические компоненты: резонаторы, фильтры, многопозиционные переключатели, управляемые конденсаторы и катушки индуктивности. МЭМС-переключатель является одним из типов электромеханического коммутатора, выполненный при помощи ЭЛТ и применяющийся для размыкания и замыкания электрической цепи.

Основой большинства МЭМС-переключателей является подвижный элемент – актюатор.

В большинстве случаев он представляет собой закреплённого, с одной стороны, кантилевера или мембраны, закреплённой по краям. Привод актюатора может быть электростатическим (ёмкостным), пьезоэлектрическим, электромагнитным или термо-электрическим. Целью данного обзора является рассмотрение кантилевера электромагнитного типа.

В МЭМС-переключателях с электромагнитным приводом актюатор перемещается при помощи магнитного поля, возникающего при пропускании электрического тока через управляющий элемент переключателя. Чаще всего в качестве управляющего элемента используется планарная катушка индуктивности, нанесённая на подложку с помощью ионного напыления. Этот тип приводов создаёт значительные механические усилия на контактах МЭМС-переключателя, позволяя взаимодействовать с мощными сигналами. С другой стороны, электромагнитным переключателям присуще сравнительно большое время срабатывания, а также наличие энергопотребления в сомкнутом состоянии. Контакты МЭМС-переключателей делают как резистивными – «металл–металл» (рисунок 1), так и ёмкостными – «металл–диэлектрик–металл». Резистивные контакты характеризует наличие сопротивления в открытом состоянии $R_{\text{вкл}}$, составляющее не более десятой доли ома, и ёмкостью в закрытом состоянии $C_{\text{выкл}}$, измеряя.

– переключатель не может управлять напряжением менее 1 В;

– у переключателя в стационарном состоянии нет потерь из-за его бистабильности;

– при использовании ёмкостных контактов возможно увеличение интенсивности излучения сигнала;

– отсутствие накопления паразитного заряда на элементах переключателя, что может привести к

появлению неконтролируемых электростатических сил, препятствующих его функционированию;

– исключение паразитной индуктивности актюаторов по причине их отсутствия в составе сигнальной цепи;

– сокращение и снижение затрат на процесс производства за счёт использования одной маски.

Из проведённого анализа видно, что МЭМС-переключатели имеют серьёзные положительные качества в сравнении с традиционными переключательными компонентами, к которым относят PIN-диоды и полевые транзисторы на основе арсенида галлия. К этим преимуществам относятся хорошая изоляция в закрытом состоянии и сравнительно низкие переносимые потери в открытом, высокая мощность коммутируемого сигнала, низкое энергопотребление, высокая устойчивость к воздействию ионизирующего излучения и низкая стоимость при массовом производстве.

Основным недостатком этих элементов остаётся их ограниченная надёжность, тем не менее, производители МЭМС пытаются улучшить эту характеристику. Ресурс электромагнитных МЭМС-переключателей на данный момент превышает миллиарды циклов в режиме «горячей» коммутации. Несомненно, МЭМС-переключатели могут использоваться в электронном оборудовании как коммерческого, так и специального назначения благодаря удачному сочетанию их свойств.

Литература

1. Кочемасов, В.А. Переключатели на основе МЭМС / В.А. Кочемасов, А. П. Майстренко. – М. : СВЧ-электроника, 2016. – 64 с.
2. MEMS Reliability / L. Allyson [et al.]. – Springer Science & Business Media, 2011.
3. Yao, J. RF MEMS switch with in-plane, bistable, electromagnetic actuators for high power applications / Y. Yao, J. Young, H // IEEE J. MEMS. – 2015. – № 8. – P. 129–34.

УДК 621.317.39.084.2

**ДВУХЭЛЕКТРОДНЫЙ ВЫСОКОСЕЛЕКТИВНЫЙ СЕНСОР ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ
МОНООКСИДА УГЛЕРОДА****Реутская О.Г.¹, Таратын И.А.¹, Осипов А.Н.², Горох Г.Г.²**¹*Белорусский национальный технический университет*²*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Разработан двухэлектродный высокочувствительный селективный сенсор для раннего обнаружения малых концентраций CO (10–100 ppm) и H₂ (0,1 %) в среде горючих газов (CH₄ – 1000 ppm). Предложен состав и метод формирования газочувствительного слоя сложного композита на основе In₂O₃–SnO₂–Co₃O₆ с наночастицами золота, обеспечивший наиболее высокий сенсорный отклик к Co, а также удовлетворительное время срабатывания и восстановления чувствительных элементов двухэлектродных газовых сенсоров на фоне горючих газов.

Ключевые слова: полупроводниковый датчик, золь-гель метод, двухэлектродный сенсор.

TWO-ELECTRODE HIGHLY SELECTIVE SENSOR FOR DETECTION OF CARBON**Reutskaya O.G.¹, Taratyn I.A.¹, Osipov A.N.², Gorokh G.G.²**¹*Belarusian National Technical University*²*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. A two-electrode highly sensitive selective sensor has been developed for early low concentrations detection of CO (10–100 ppm) and H₂ (0.1 %) in flammable gases (CH₄ – 1000 ppm). A composition and method for forming the gas-sensitive layer of a complex composite based on In₂O₃–SnO₂–Co₃O₄ with gold nanoparticles is proposed, which provides the highest sensory response to Co and H₂, as well as satisfactory response and recovery time of the two-electrode gas sensors sensitive elements against the background of flammable gases.

Key words: semiconductor sensor, sol-gel method, two-electrode sensor.

*Адрес для переписки: Реутская О.Г., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: oreutskaya@bntu.by*

Металлооксидные полупроводниковые материалы системы In–Sn–O широко используются в газовых сенсорах, при этом функциональность и эффективность таких материалов определяется их химическим составом и структурными параметрами [1]. Кроме этого, на их чувствительность и селективность большое влияние оказывают добавки благородных металлов [2]. При разработке газовых сенсоров для систем раннего обнаружения пожаров существует проблема создания высокочувствительных селективных сенсоров, способных реагировать на малые концентрации CO и H₂ в газовой смеси, содержащей относительно высокие концентрации горючих газов. В настоящей работе представлены результаты создания селективного сенсора к CO и слабо реагирующего на CH₄.

Конструкция двухэлектродного сенсора представляла собой нагреватель в виде платинового двухпетельного меандра, в центральном зазоре которого располагался измерительный электрод. Питание нагревателя осуществлялось от источника постоянного тока, положительный контакт которого был соединен с положительным контактом измерительного электрода, в цепи которого находился микроамперметр, регистрирующий изменения тока при измерениях. Величина зазора между платиновыми проводниками нагревателя и

измерительным электродом составляла 30 мкм. Сопротивление нагревателя 16 Ом.

В качестве газочувствительного слоя была использована многокомпонентная металлооксидная керамика на основе In₂O₃–SnO₂–Co₃O₄ с наночастицами золота. Газочувствительный слой формировали золь-гель методом с промежуточной термической обработкой ксерогелей. Сначала на горячую кремниевую подложку наносили раствор In₂O₃(95 %)–SnO₂(5 %) после чего его подвергали термодинамическому отжигу при температуре 600–650 °C в течение 50 часов. Затем наносили раствор ацетата кобальта (<5 %), а после сушки на полученную пленку наносили раствор H₂AuCl₄ и подвергали всю систему отжигу при температуре 800–850 °C в течение 8 часов. Содержание Au составляло не менее 0,05–0,01 %. Последовательное нанесение оксидов и термическая обработка позволило добиться минимизации размеров кристаллитов формируемых композитов и возрастания их удельной поверхности, что способствовало повышению чувствительности слоя. Толщина сформированного слоя составляла 150 мкм, а его сопротивление в зазоре 1,6 кОм.

Исследование отклика сенсора на CO и H₂ проводили на экспериментальном стенде, состоящем из измерительной ячейки, системы создания и

поддержания заданной газовой среды в ячейке и приборов измерения электрических сигналов. Для разбавления поверочной газовой смеси использовали газогенератор. В качестве поверочной газовой смеси использовали газовую смесь с содержанием анализируемого газа заданной концентрации. Газом-разбавителем служил очищенный воздух ($2O_2 + N_2$). Контроль над ходом эксперимента осуществляли при помощи информации, фиксируемой измерительными приборами, микроконтроллерами потока газа газогенератора, передаваемой на персональный компьютер. Отклик сенсорной структуры к анализируемым газам снимали при потребляемой мощности нагревателя, обеспечивающей максимальный отклик. Цикл измерений начинали с включения клапанов газогенератора в сочетании, обеспечивающем минимальное содержание исходного газа в газовой смеси, после чего газовая смесь после предварительной прокачки подавалась в измерительную ячейку.

Вольтамперная характеристика сенсора представлена на рисунке 1.

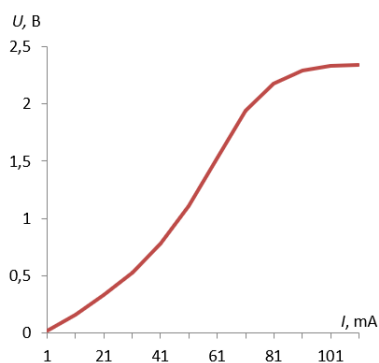


Рисунок 1 – Воль-амперная характеристика нагревателя двухэлектродного сенсора

Токи на нагревателе при измерении CO находятся диапазоне 60–80 мА (220–240 °С). Выбор композиции для газочувствительного слоя был обусловлен высокой избирательностью материалов к детектированию горючих и взрывоопасных газов таких как CO и CH_4 . Результаты измерения

выходных сигналов сенсоров на CO (10–100 ppm) представлены на рисунке 2. Сенсор реагирует на малые концентрации CO, чувствительность возрастает с увеличением концентрации. При этом этот сенсор практически не реагирует на метан при концентрациях от 100 ppm до 1000 ppm. Его чувствительность к CH_4 на несколько порядков (в зависимости от концентрации) ниже чувствительности к CO и H_2 .

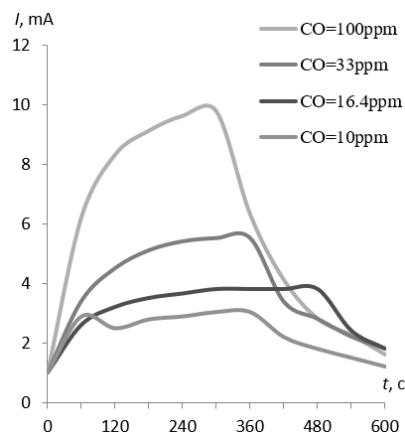


Рисунок 2 – Сигнал сенсора при воздействии CO

Проведенные исследования показали, что разработанные двухэлектродные сенсоры с газочувствительными слоями на основе многокомпонентной металлооксидной керамики на основе $In_2O_3-SnO_2-Co_3O_4$ с наночастицами золота обладает высокой селективностью к CO и практически не реагируют на относительно высокие концентрации CH_4 .

Литература

1. A Micropowered Chemoresistive Sensor Based on a Thin Alumina Nanoporous Membrane and $SnxBik-MoyOz$ Nanocomposite. / G. Gorokh [et al.] // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – P. 3640–3657.
2. Гайдук, Ю.С. Влияние добавок благородных металлов на газочувствительные свойства оксида вольфрама, полученного золь-гель методом / Ю.С. Гайдук, А.А. Савицкий // Весці НАНБ. Серія хім. навук. – 2015. – № 4. – С. 11–16.

УДК 579.693.3

МЕМБРАННЫЕ БИОСЕНСОРЫ
Люцко К.С., Россоловский А.Ю.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Мембранные биосенсоры широко применяются в медицинских и биологических исследованиях, а также в промышленности и экологии. В работе рассмотрен технологический процесс и оборудование создания мембранных биосенсоров.

Ключевые слова: мембрана, биорецептор, трансдуктор, системы, биоактивный элемент.

MEMBRANE BIOSENSORS
Lyutsko K.S., Rossolovsky A.Yu.

¹Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Membrane biosensors are widely used in medical and biological research, as well as in industry and ecology. The paper considers the technological process and equipment for creating membrane biosensors.

Key words: membrane, bioreceptor, transducer, systems, bioactive element.

Адрес для переписки: Люцко.К.С., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: liutsko@bntu.by

Мембранные биосенсоры – устройства используемые для обнаружения и измерения биологически активных веществ в различных областях, таких как медицина, экология и пищевая промышленность.

В состав мембранных биосенсоров входит три основных компонента: биорецептор, трансдуктор и мембрана. В качестве биорецептора может выступать белковая или другая молекула специфически связывающаяся с целевым анализом (молекулой, которую необходимо обнаружить). Биорецепторами могут быть антитела, ферменты, ДНК и РНК, а также другие молекулы, способные взаимодействовать с целевым анализом. Трансдуктор – устройство, преобразующее сигнал полученный от биорецептора для дальнейшего измерения. Трансдуктором может быть электронный датчик, измеряющий изменение электрического потенциала или сопротивления при связывании биорецептора с целевым анализом. Мембрана – слой материала разделяющий биорецептор и трансдуктор, выполняющий функцию защиты биорецептора от внешних воздействий. Мембрана может быть изготовлена из полимерного материала или белка, может иметь различную структуру, форму и толщину в зависимости от конкретной задачи. Данные компоненты работают вместе для обнаружения и измерения концентрации целевого анализа в образце. Так при связывании биорецептора с целевым анализом происходит изменение физических, химических или физико-химических свойств мембраны, которое затем преобразуется трансдуктором в измеряемый сигнал. Этот сигнал может быть использован для определения концентрации целевого анализа в образце [1].

Мембранные биосенсоры классифицируются по различным критериям: тип мембраны, тип биологического компонента и метод обнаружения.

По типу мембраны могут быть представлены биосенсоры на основе полимеров, керамики, стекла и других материалов. По типу биологического компонента выделяют мембранные биосенсоры на основе антител, ферментов, нуклеиновых кислот. По методу обнаружения выделяют электрохимические, оптические и т. д. [2].

Технология получения мембранных биосенсоров обычно состоит из следующих этапов:

– выбор типа мембраны и биоактивного элемента. В зависимости от устройства и цели исследования, выбирается мембрана и биоактивный элемент, который будет инкапсулирован в мембране;

– подготовка поверхности мембраны. Для обеспечения хорошего сцепления мембраны и биоактивного элемента может быть необходима подготовка мембраны, например, обработка ее с помощью кислот или биологически активных веществ;

– нанесение биоактивного элемента на мембрану. Происходит при помощи различных технологий: нанесение слоя жидких кристаллов, покрытие мембраны с помощью антител или использование метода самоорганизации;

– химическая модификация мембраны и биоактивного элемента. Этот этап включает модификацию поверхностного заряда или использование других методов модификации, для улучшения устойчивости или улучшения специфичности биосенсора;

– тестирование биосенсора. После всех этапов подготовки биосенсор готов к тестированию. Большинство биосенсоров тестируются в различных условиях. Например, в различных буферных растворах, для подтверждения работы устройства на определенных условиях.

Получение мембранных биосенсоров является многоэтапным процессом, где каждый участок

технологии зависит от конкретных условий и целей устройства [3].

Технологическая установка для получения мембранных биосенсоров может быть создана на основе следующих основных узлов и блоков:

- нанесение мембраны. Позволяет наносить мембрану на определенную поверхность. Например, при помощи покрытия или осаждения на субстрате;
- очистка. Для обеспечения надлежащего качества мембраны все поверхности должны быть очищены от следов загрязнения. Для этого используются различные очищающие реагенты;
- дегазация. Для удаления газов из растворов используют систему дегазации, способствующую уменьшению количества свободного газа, в результате чего повышается точность измерений;
- диспенсирование. Способствует правильной дозировке и распределению реагентов;
- система измерения. Способствует обработке сигналов возникающих в результате взаимодействия мембраны и биоактивного элемента;
- система автоматического контроля. Определяет готовность процесса и возможность начала следующего этапа;
- интерфейс между пользователем и технологической установкой. Интерфейс с настольным приложением для управления каждым этапом процесса и контроля за его параметрами.

Мембранные биосенсоры работают на основе взаимодействия биологических компонентов, таких как антитела или ферменты, с молекулами-мишенями на поверхности мембраны. Взаимодействие между биологическим компонентом и молекулой-мишенью приводит к изменению свойств мембраны, которые могут быть обнаружены с помощью различных методов обнаружения, таких как электрохимический или оптический. Производство мембранных биосенсоров включает несколько этапов, включая выбор материала мембраны, иммобилизацию биологического компонента на поверхности мембраны и оптимизацию метода обнаружения. Иммобилизация биологического компонента, может быть, достигнута с помощью различных методов, таких как физическая адсорбция, коагуляция или химическая модификация. Мембранные биосенсоры могут быть использованы для определения различных веществ, таких как металлы, белки, вирусы и гормоны. Они имеют много преимуществ, включая высокую чувствительность, специфичность и быстроту анализа [1].

Процесс изготовления мембранного биосенсора может быть довольно сложным и может зависеть от использованной технологии, которую выбирает исследователь, однако, в общих чертах, процесс может выглядеть следующим образом:

- подготовка поверхности: сначала необходимо подготовить поверхность подложки (например, стеклянного слайда, кремниевой пластины

или золотого диска), на которую будет нанесена мембрана. Эта поверхность должна быть очищена и обработана таким образом, чтобы обеспечить оптимальное сцепление и хорошее распределение мембраны;

- создание мембраны: затем следует создать мембрану, используя определенную технологию. Например, мембрану можно создать путем нанесения слоя полимера или липидов на поверхность подложки. Мембрана может содержать связующие молекулы или белки, а также определенные молекулы, которые специфично взаимодействуют с интересующей их биомолекулой;

- функционализация мембраны: после создания мембраны она должна быть функционализирована, чтобы обеспечить специфичную связь с биомолекулами, которые будут анализироваться. Это может включать обработку мембраны определенными растворами, чтобы в определенных местах на мембране образовались активные группы, такие как аминогруппы или карбоксильные группы. Функционализированная мембрана готова для использования;

- анализ биомолекул: после приготовления мембранного биосенсора, на его поверхность наносятся биомолекулы, которые будут анализироваться. Например, это могут быть антитела, ДНК или другие биомолекулы, которые должны вступить во взаимодействие со специфическими молекулами, находящимися в пробе;

- измерение: затем происходит измерение взаимодействия между биомолекулами, находящимися на поверхности мембраны, и биомолекулами в пробе. Обычно используются различные методы измерения, включая количественный анализ, визуализацию молекул, изучение кинетики взаимодействия и другие методы [4].

Актуальность применения мембранных биосенсоров обусловлена их высокой чувствительностью, специфичностью и быстротой анализа, что позволяет диагностировать различные заболевания и контролировать качество продуктов питания и окружающей среды. Мембранные биосенсоры также имеют потенциал для использования в медицинских исследованиях, разработке новых лекарственных препаратов и биотехнологических процессах.

Литература

1. Kumar, S.A. Membrane-based biosensors: A review / S.A. Kumar, A.K. Srivastava, R. Kumar // *Biosensors and Bioelectronics*. – 2013. – Vol. 41. – P. 103–117.
2. Biosensors based on membrane-mediated transduction / B.C. Baudner [et al.] // *Advances in and Interface Science*. – 2018. – Vol. 254. – P. 41–54.
3. Poghossian, A. Label-free detection of biomolecules with field-effect transistors / A. Poghossian, M.J. Schöning // *Advanced Materials*. – 2014. – № 26 (20). – P. 3074–3086.
4. Homola, J. Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species / J. Homola // *Chemical Reviews*. – 2006. – № 106 (12). – P. 4875–4890.

УДК 621.3.049.78

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ЛОГИЧЕСКИЙ ВЕНТИЛЬ С ДВУМЯ ПАРАМИ ИСТОК/СТОК И РАЗДЕЛЕННЫМ УПРАВЛЯЮЩИМ ЭЛЕКТРОДОМ

Соловьев А.А., Певцов Е.Ф.

ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»
Москва, Российская Федерация

Аннотация. В данной работе представлена конструкция микроэлектромеханического логического вентиля с двумя парами исток/сток и разделенным управляющим электродом (двойным затвором) для реализации полного набора логических операций. Описаны динамически конфигурируемые энергоэффективные цифровые схемы, осуществляющие логические операции И/И-НЕ и ИЛИ/ИЛИ-НЕ и предназначенные для использования в экстремальных условиях эксплуатации, при этом имеющие умеренные требования к производительности.

Ключевые слова: микроэлектромеханические переключатели; МЭМС; логические вентили, цифровые схемы.

MICROMECHANICAL LOGIC GATE WITH DOUBLE SOURCE/DRAIN AND SPLIT GATE

Solovov A.A., Pevtsov E.F.

MIREA – Russian Technological University
Moscow, Russian Federation

Abstract. This paper introduces the design of a micromechanical logic gate featuring dual source/drain and a split gate (double gate) to realize a functionally complete set of logical operations. Dynamically configurable, energy-efficient digital circuits executing AND/NAND and OR/NOR logical operations are presented, suitable for deployment in extreme operating conditions, while maintaining moderate performance requirements.

Key words: microelectromechanical systems, MEMS, logic gate.

Адрес для переписки: Соловьев А.А., проспект Вернадского, 78, г. Москва, 119454, Российская Федерация
e-mail: solovov_aa@mirea.ru

Микроэлектромеханические (МЭМС) логические вентили представляют собой перспективные аналоги КМОП-транзисторов за счет сверхнизких токов утечки. Несмотря на большие размеры и низкую скорость переключения, преимущество МЭМС-вентилей заключается в лучшей энергоэффективности и способности работать в экстремальных условиях эксплуатации, включая ионизирующее излучение и широкий температурный диапазон, при умеренных требованиях к производительности [1].

Цель данного исследования заключается в разработке универсальной конструкции логического МЭМС-вентилей с разделенным управляющим затвором и двумя парами исток/сток для реализации функционально полного набора логических операций. Базируясь на этой конструкции, разрабатываются динамически конфигурируемые энергоэффективные цифровые схемы, способные выполнять логические операции И/И-НЕ и ИЛИ/ИЛИ-НЕ.

Универсальная конструкция МЭМС логического вентиля, способного выполнять все логические операции с помощью одного структурного блока, может быть создана, используя электростатическую силу, зависящую от площади управляющего электрода [2].

Разделение фиксированного электрода, используемого в качестве затвора, на несколько отдельных электродов, которые могут быть независимо смещены, позволяет контролировать ак-

тивацию МЭМС-вентилей. Разделение фиксированного затвора на электроды различной площади позволяет создать приводы с различным влиянием на активацию вентиля и реализовать логические МЭМС-вентили, выполняющие полный набор операций булевой алгебры [3].

Модель логического МЭМС-вентилей с двумя затворами (2 входа) и двумя парами истока/стока (2 выхода) показана на рисунке 1. В данном примере электроды затвора имеют одинаковую площадь и соединены для обеспечения равного влияния на активацию вентиля.



Рисунок 1 – Модель логического МЭМС вентиля с двумя затворами и двумя парами исток/сток в САПР CoventorMP

Для данной конструкции, если на затвор 1 подается напряжение («1»), а затвор 2 остается на уровне 0 В («0»), то напряжение включения (V_{PI}) составляет 15 В, а напряжение размыкания (V_{RL}) –

9 В при смещении корпуса $V_B = 0$ В. При изменении напряжений между затворами напряжения остаются неизменными, что подтверждает равное влияние затвора 1 и 2.

В случае, когда на оба затвора подается «1», напряжение переключения уменьшается ($V_{PI} = 11$ В, $V_{RL} = 6$ В) из-за более сильной электростатической силы при том же напряжении смещения корпуса, так как эффективная площадь срабатывания удваивается.

Это свойство позволяет применять различные напряжения смещения корпуса для переключения МЭМС-вентилей с помощью одного или двух электродов затвора при одинаковом напряжении V_G . Например, для реализации операции «Логическое И», смещение корпуса (V_B) должно быть -4 В при напряжении затвора (V_G) 8 В. Для замыкания МЭМС-вентилей необходимо подать высокий уровень сигнала на оба затвора. В таблице 1 представлены напряжения смещения корпуса (V_B) для реализации с помощью одного функционального структурного логического МЭМС-вентилей логических операций И/И-НЕ и ИЛИ/ИЛИ-НЕ.

Таблица 1. Напряжение смещения корпуса для логических вентиляей

Логическая Операция	И	И-НЕ	ИЛИ	ИЛИ-НЕ
Напряжение смещения корпуса (V_B), В	-4	15	-7	12

Конструкция МЭМС-вентилей с несколькими электродами позволяет создать динамически конфигурируемую схему с множеством входов и выходов. Она состоит из двух МЭМС-вентилей, объединенных вместе, и может функционировать как логический элемент И/И-НЕ или ИЛИ/ИЛИ-НЕ, в зависимости от смещения корпуса (рисунок 2).

В данной схеме верхний МЭМС-вентиль активируется только тогда, когда оба затвора имеют высокий уровень – «1». Нижний МЭМС-вентиль активируется, когда хотя бы один затвор имеет низкий уровень – «0». Смещение истока (V_{DD} или GND) определяет, является ли данный вентиль «повышающим» или «понижающим» выходной логический уровень.

Изменяя смещение корпуса, данная схема может осуществлять функции ИЛИ/ИЛИ-НЕ [4]. Конструкцию МЭМС-вентилей можно расширить до большего количества затворов и пар электродов

исток/сток для реализации более сложных динамически конфигурируемых логических функций.

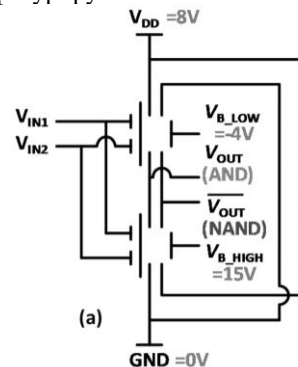


Рисунок 2 – Принципиальная схема и смещение корпуса для логической операции «И/И-НЕ»

Данная работа демонстрирует перспективы компактной реализации СБИС на основе МЭМС для применений с требованиями к сверхнизкому энергопотреблению. Несмотря на ограниченную масштабируемость, можно достичь общей экономии площади с помощью уменьшения количества устройств, необходимых для цифровой схемы. Это сократит механическую задержку до одной на логическую операцию, повысив надежность, производительность и характеристики.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание для университетов № ФГФЗ-2023-0005) и с использованием оборудования Центра коллективного пользования РТУ МИРЭА (соглашение от 01.09.2021 № 075–15-2021-689, уникальный идентификационный номер 2296.61321X0010).

Литература

1. Соловьёв, А.А. Реализация функционально полного набора логических вентиляей на основе МЭМС / А.А. Соловьёв // Наноиндустрия. – 2020. – Т. 13, № S5-3 (102). – С. 899–902.
2. Соловьёв, А.А. Интегральный микроэлектромеханический логический вентиль электростатического типа В / А.А. Соловьёв, Е.Ф. Певцов // Наноиндустрия. – 2022. – Т. 15, № S8 (113). – С. 595–601.
3. Соловьёв, А.А. Схемы полного сумматора, Д-триггера на МЭМС-переключателях с активным механизмом размыкания / А.А. Соловьёв, Е.Ф. Певцов // Наноиндустрия. – 2023. – Т. 16, № S9-2(119). – С. 338–342.
4. Design, Optimization, and Scaling of MEM Relays for Ultra-Low-Power Digital Logic / H. Kam [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2011. – Vol. 58, № 1.

УДК 681.586.7

ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СЛОИ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛА ДЛЯ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ**Баранова А.С.¹, Мельникова Г.Б.¹, Довгаль М.И.¹, Сапсалёв Д.В.¹, Аксютчиц А.В.², Толстая Т.Н.¹, Котов Д.А.², Чижик С.А.^{1,3}**¹*Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси*²*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники*³*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Разработаны емкостные датчики температуры с чувствительным слоем на основе полиметилметакрилата. Методом атомно-силовой микроскопии изучены топография поверхности пленок, нанесенных методом спин-коатинга, показана зависимость электрической емкости и модуля упругости сформированных покрытий от температуры.

Ключевые слова: тонкие пленки полиметилметакрилата, атомно-силовая микроскопия, спин-коатинг, емкостные датчики.

SENSITIVE LAYERS OF POLYMETHYLMETHACRYLATE FOR CAPACITIVE TEMPERATURE SENSORS**Baranova A.S.¹, Melnikova G.B.¹, Dovgal M.I.¹, Sapsaliou D.V.¹, Aksyuchits A.V.², Tolstaya T.N.¹, Kotov D.A.², Chizhik S.A.¹**¹*Institute of Heat and Mass Transfer named after A.V. Lykov NAS of Belarus*²*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics**Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Capacitive temperature sensors with polymethyl methacrylate sensitive layer are developed. Topography of the surface of films deposited by the spin-coating method were studied, and the dependence of the electrical capacitance and elastic modulus of the formed coatings on temperature was shown.

Key words: polymethyl methacrylate thin films, atomic force microscopy, spin-coating, capacitive sensors.

Адрес для переписки: Баранова А.С., ул. П. Бровки, 15, г. Минск, 220072, Республика Беларусь

e-mail: alesyanova@bk.ru

С развитием технологий возникает потребность в создании более универсальных датчиков, способных работать в широком диапазоне температур, обладающих высокой точностью и низким энергопотреблением. Использование полимерных материалов, таких как полиметилметакрилат (ПММА) [1; 2], является одним из перспективных решением. Полимерные материалы обладают рядом существенных преимуществ, включая высокую термическую чувствительность и способность адаптироваться к широкому диапазону температур, что обеспечивает долговечность и стабильность работы датчиков.

Экспериментальная часть. Для получения емкостных датчиков использовали ситалловые подложки, которые служили основой для проводящего слоя из наноструктурированного никеля, нанесенного методом ионно-лучевого распыления [3], а в качестве чувствительного слоя был использован полиметилметакрилат (ПММА, Sigma-Aldrich, $M_r \approx 10\,000$).

Методом спин-коатинга формировали чувствительный полимерный слой. На подложки, вращающиеся со скоростью 3200 оборотов в минуту, прикапывали 6 мкл раствора ПММА в хлороформе с концентрацией 1 мг/мл.

Оценку емкостных характеристик датчика проводили на основании анализа зависимости ем-

кости от температуры при частоте 212 Гц (измеритель иммитанса Е7-25), выдерживая на воздухе с использованием термоплатформы в течение 15 минут в диапазоне температур от 25 до 140 °С.

Методом атомно-силовой микроскопии (НТ-206, ОДО «Микротестмашины», Республика Беларусь) изучали топографию поверхности и определяли модуль упругости слоев полиметилметакрилата.

Результаты и их обсуждение. На основании анализа данных атомно-силовой микроскопии показано, что пленки ПММА имеют неоднородную структуру по сравнению с исходным датчиком (рисунок 1). Отмечается наличие сферических конгломератов размерами от 100 до 1000 нм для 1 и 5 слоев ПММА и 400 – 1400 нм для 10 слоев.

Зависимость электрической емкости (C) от температуры (T) имеет скачкообразный характер для всех образцов (рисунок 2). Отмечается две области изменения данного параметра. В первой, до 80 °С, изменения могут быть обусловлены неоднородностями сформированных слоев, приводящие при нагреве к изменению морфологических параметров как на поверхности, так и в объеме материала. Во второй, от 100 °С, основной вклад вносят фазовые переходы полимера, а именно размягчение и расплав ПММА, что приводит к росту значений емкости.

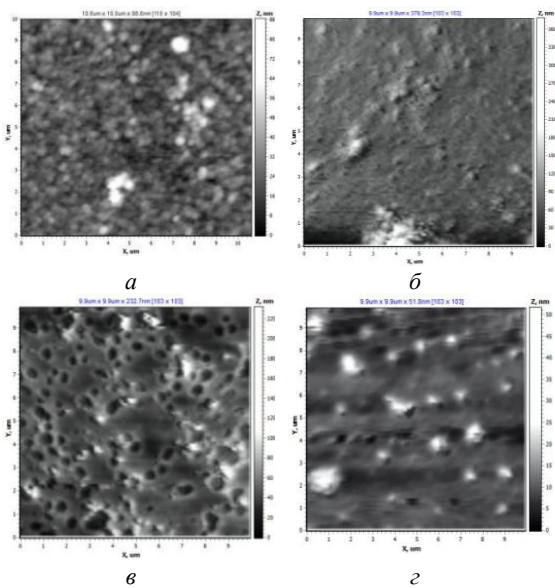


Рисунок 1 – АСМ-структура исходного датчика (а) и пленок ПММА: 1 слой (б), 5 слоев (в), 10 слоев (з)

Монослойные покрытия в заданном диапазоне температур характеризуются наименьшей чувствительностью к воздействию температуры по сравнению с многослойными пленками. Значение емкости принимает значения в диапазоне от 2,54 пФ (100 °С) до 8,05 пФ (60 °С).

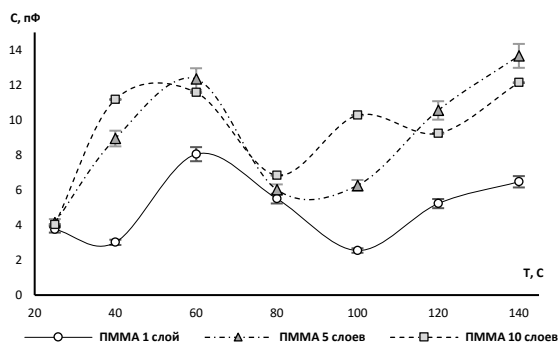


Рисунок 2 – Зависимость электрической емкости сформированных покрытий от температуры при 212 Гц

Для 5 слоев ПММА отмечается пик при 60 и 140 °С, где емкость принимает значения 12,34 и 13,66 пФ соответственно. Образец с 10 слоями ПММА имеет три пика со значениями электрической емкости 11,57 пФ (60 °С), 10,27 пФ (100 °С) и 12,13 пФ (140 °С).

Таким образом, в диапазоне температур от 25 до 140 °С монослойные покрытия характеризуются наименьшей чувствительностью к воздействию температуры по сравнению с многослойными пленками.

Воздействие температуры на пленки ПММА приводит к плавному снижению значений модуля упругости, что подтверждает предположение о размягчении материала (рисунок 3).

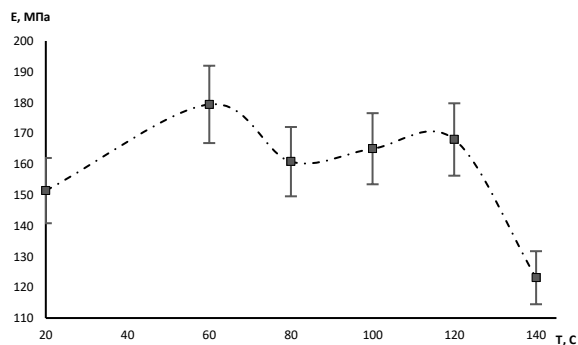


Рисунок 3 – Влияние температуры на значения модуля упругости пленок ПММА

Заключение. На основе проведенных исследований разработаны емкостные датчики температуры с чувствительным слоем на основе ПММА. Показано, что увеличение количества слоев полимера приводит к повышению чувствительности датчика.

Благодарность. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Энергетические и ядерные процессы и технологии», подпрограмма «Энергетические процессы и технологии», зад. 2.25.

Литература

1. Khaleel, A. Synthesis and characterization of PVDF/PMMA/ZnO hybrid nanocomposite thin films for humidity sensor application / A. Khaleel, L. Abbas // *Optik*. – 2022. – V. 272. – P. 170288.
2. Capacitive and resistive response of humidity sensors based on graphene decorated by PMMA and silver nanoparticles / I. Rahim [et al.] // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2018. – V. 26. – P. 42–50.
3. Тонкие полимерные пленки на основе полиметилметакрилата для анализа содержания катионов тяжелых металлов в воде / Д. В. Сапсадев [и др.] // *Приборостроение – 2022: материалы 15-й Международной научно-технической конференции, 16–18 ноября 2022 г. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 435–43.*

УДК 681.586.7

НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ЛЕНГМЮРА–БЛОДЖЕТТ ПЛЕНОК ПЕРФТОРОКТАДЕКАНОВОЙ КИСЛОТЫ ДЛЯ ГИБКИХ ДАТЧИКОВ АНАЛИЗА ИОНОВ СВИНЦА В ВОДЕ

Мельникова Г.Б.^{1,2}, Толстая Т.Н.¹, Сапсалёв Д.В.¹, Корольков И.В.^{2,3}, Жуманазар Н.Н.^{2,3}
Чижик С.А.^{1,5}, Здоровец М.В.^{2,3,4}

¹*Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

²*Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева
Астана, Республика Казахстан*

³*Институт ядерной физики
Алматы, Республика Казахстан*

⁴*Уральский федеральный университет
Российская Федерация*

⁵*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Разработаны методики модификации полиэтилентерефталатных трековых мембран (ПЭТФ ТМ) монослойным покрытием на основе перфтороктадекановой кислоты (ПФОДК) методом Ленгмюра–Блоджетт, а также двухслойными покрытиями ПФОДК/диметилглиоксим (ДМГ) путем выдерживания ПЭТФ ТМ/ПФОДК в растворах красителя. Методом атомно-силовой микроскопии изучена структура ПЭТФ ТМ до и после модификации. На основании измерения электрохимических характеристик установлено, что модифицированные мембраны имеют более высокие отклик электрохимических характеристик по сравнению с ПЭТФ ТМ. Рабочий диапазон обнаружения ионов свинца в водных растворах при pH 12 для датчиков ПЭТФ ТМ/ПФОДК составляет от 2,26 мкг/л до 500 мкг/л.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, гибкие датчики, Ленгмюра–Блоджетт технология, структура, перфтороктадекановая кислота.

NANOSTRUCTURED COATINGS BASED ON LANGMUIR–BLODGETT FILMS OF PERFLUORO-OCTADECANOIC ACID FOR FLEXIBLE SENSORS FOR THE ANALYSIS OF LEAD IONS IN WATER

Melnikova G.B.^{1,2}, Tolstaya T.N.¹, Sapsaliou D.V.¹, Korolkov I.V.^{2,3}, Zhumanazar N.N.², Chizhik S.A.^{1,5}, Zdorovets M.V.^{2,3,4}

¹*A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

²*L.N. Gumilyov Eurasian National University
Astana, Kazakhstan*

³*The Institute of Nuclear Physics
Almaty, Kazakhstan*

⁴*Ural Federal University, Ekaterinburg
Russian Federation*

⁵*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Techniques for modifying polyethylene terephthalate track-etched membranes (PET TM) with a monolayer based on perfluorooctadecanoic acid (PFODA) using the Langmuir-Blodgett method, as well as two-layer PFODA/dimethylglyoxime (DMG) coatings by keeping PET TM/PFODA in dye solutions have been developed. The structure of PET TM before and after modification was studied using atomic force microscopy. Based on measurements of electrochemical characteristics, it was found that the modified membranes have a higher response of electrochemical characteristics compared to PET TM. The limit of lead ions detection in aqueous solutions at pH 12 for PET TM/PFODA sensors is from 2.26 µg/L to 20.0 µg/L.

Key words: atomic force microscopy, flexible sensors, Langmuir–Blodgett technology, structure, perfluoro-octadecanoic acid.

*Адрес для переписки: Мельникова Г.Б., ул. П. Бровки, 15, г. Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: galachka@gmail.com*

Тяжелые металлы относятся к одним из основных загрязнителей окружающей среды. Разработка новых надежных и портативных методов контроля является перспективной задачей в области развития микроэлектромеханических систем.

Экспериментальная часть. В качестве гибкой полимерной подложки использовали полиэтилентерефталатные трековые мембраны (ПЭТФ ТМ) с диаметром пор 50 нм. Методика получения ТМ описана в работе [1].

Наноструктурированные чувствительные покрытия на поверхности мембран формировали методом Ленгмюра–Блоджетт (ЛБ) с использованием горизонтального типа выделения на установке «Автоматизированный комплекс для модифицирования поверхностей мембран молекулярными и ультратонкими слоями» (Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, Беларусь). Мономолекулярные слои перфтороктадекановой формировали из раствора (ПФОДК, $\text{CF}_3(\text{CF}_2)_{16}\text{CO}_2\text{H}$, AlfaAesar) в гексафторбензоле с концентрацией 0,5 мг/мл. Согласно изотермам сжатия для ПФОДК фазовое состояние «твердая пленка» соответствует $\pi = 10$ мН/м.

Многослойные покрытия формировали путем последующего нанесения пленки диметилглиоксима (ДМГ) методом спин-коатинга. Для этого аликвоту раствора ДМГ в этиловом спирте ($c = 1$ мг/мл) объемом 9 мкл прикапывали на подложку, вращающуюся со скоростью 3200 об/мин в течение 1 мин.

Структуру поверхности мембран изучали на атомно-силовом микроскопе (НТ-206, ОДО «Микротестмашины», Республика Беларусь) с использованием стандартных кремниевых кантилеверов FMG 01 («TIPSNano», Российская Федерация) и радиусом кривизны не более 10 нм.

Датчики изготавливали на основе ТМ, с обеих сторон которых наносили слои золота толщиной 60 нм методом магнетронного напыления с использованием шаблона. Калибровку и определение рабочих характеристик датчиков осуществляли в растворах, приготовленных последовательным разбавлением стандартного раствора ионов свинца (НК-ЭК, 10 г/дм³, ООО «Экросхим», Российская Федерация), варьируя концентрацию ионов свинца от 0,01 мг/л до 1 мг/л. В присутствии электрода сравнения (Ag/AgCl, 1М KCl) при потенциале $-1,2$ В в течение 60 с проводили осаждение ионов свинца. Сканирование вольт-амперных характеристик выполняли от -1 до 1 В. В качестве электролита использовали 0,1 М раствор ацетата натрия.

Результаты и их обсуждение. На основании анализа структуры поверхности (рисунок 1) показано, что ЛБ-пленка ПФОДК формирует однородный мономолекулярный слой.

Значения шероховатости R_a и R_q модифицированных поверхностей по сравнению с исходными мембранами снижаются до значений 1,0 и 1,3 нм соответственно. Слой ДМГ равномерно распределен на поверхности ПЭТФ ТМ, отмечается наличие единичных конгломератов, значения R_a и R_q близки к значениям для исходных мембран: и составляют 1,5 и 2,0 нм, соответственно.

Согласно электрохимическим характеристикам установлено увеличение отклика сенсоров в области концентраций до 500 мкг/л (рисунок 2).

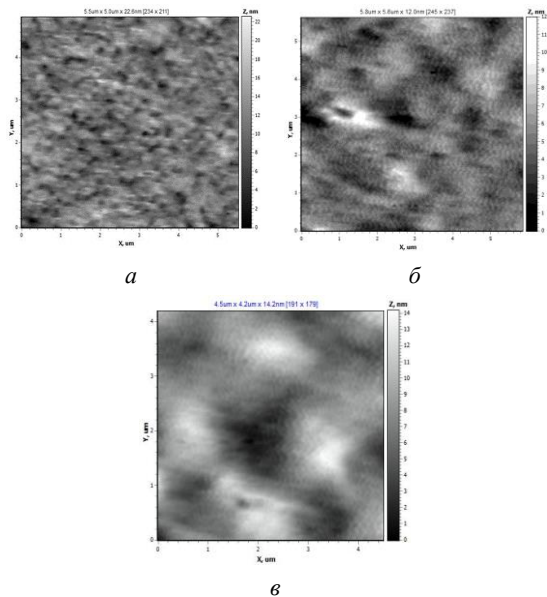


Рисунок 1 – АСМ-структура исходных ПЭТФ ТМ с диаметром пор 50 нм (а) и модифицированных ПФОДК (б) и ПФОДК/ДМГ (в)

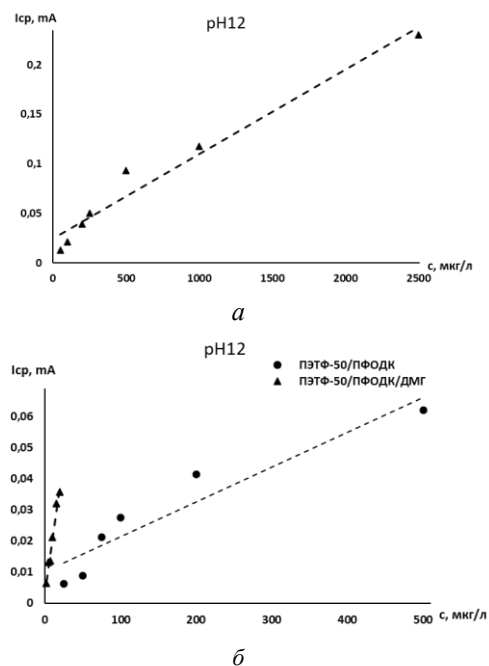


Рисунок 2 – Зависимость силы тока от концентрации для исходных (а) и модифицированных (б) ПЭТФ ТМ при pH 12

Показано, что предельно допустимая концентрация определения ионов свинца в водных растворах для гибкого датчика типа ПЭТФ ТМ / ПФОДК составила от 30 до 500 мкг/л, для ПЭТФ ТМ/ПФОДК – от 2,26 до 20 мкг/л. В то время как для исходных мембран значения данной концентрации не ниже 350 мкг/л.

Заключение. На основании полученных данных структуры и электрохимических характеристик разработаны гибкие датчики, позволяющие

определять ионы свинца в водных растворах при концентрациях от 2,26 мкг/л.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор от 04.05.2022 № Т22МС-029).

Литература

1. Application of Silver-Loaded Composite Track-Etched Membranes for Photocatalytic Decomposition of Methylene Blue under Visible Light / A.A. Mashentseva [et al.] // Membranes. – 2021. – Vol. 11. – P.11010060.

УДК 621.3.049

ДИАГНОСТИКА КАЧЕСТВА СБОРКИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТРОЙСТВА ИК-НАГРЕВА И ВАКУУМИРОВАНИЯ

Некрасевич Д.А.¹, Щербаклова Е.Н.²

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕРАЛ»,

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены результаты исследования уровня влаги в корпусах интегральных схем, определен оптимальный метод герметизации корпусов для минимального содержания внутрикорпусной влаги.

Ключевые слова: интегральная микросхема, сборка, ИК-нагрев.

DIAGNOSTICS OF ASSEMBLY QUALITY OF INTEGRATED CIRCUITS USING IR HEATING AND VACUUMING DEVICES

Nekrashevich D.A.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 results of a study of the moisture level in integrated circuit packages are presented, and the optimal method of sealing packages to minimize the content of intra-case moisture is determined.

Key words: integrated circuit, assembly, IR heating.

Адрес для переписки: Щербаклова Е.Н., ул. Я. Коласа, 22, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: scherbakova@bntu.by

Операции сборки были и остаются наиболее трудоемкими в техпроцессе изготовления полупроводниковых приборов и ИМС. Миниатюризация, увеличение функциональной сложности и уменьшение стоимости микросхем создают необходимость в постоянном поиске новых и модернизации существующих технологий производства.

При контроле прочности крепления кристалла клей должен обеспечивать высокую надежность соединения, необходимое количество передачи тепла от кристалла к подложке, снижение механических напряжений в активной структуре. Процесс соединения кристалла с выводами основания выполнялся методом ультразвуковой сварки.

Визуальный контроль микросхем до монтажа кристаллов и после сборочных операций перед герметизацией необходим для обнаружения производственных дефектов, которые не могут быть выявлены другими видами испытаний: дефектов металлизации кристаллов, скрайбирования, монтажа и разварки кристаллов, которые впоследствии могут вызвать отказы микросхем при их эксплуатации.

Термовыдержка проводится для стабилизации электрических параметров микросхем и снятия механических напряжений. После проведения

монтажа кристаллов, разварки межсоединений и промежуточных операций выполняют операцию сварки крышки с основанием корпуса. Затем производилась герметизация с термообработкой и ИК-отжигом. При достижении заданной температуры печь охлаждается и закачивается азот.

Внутри скафандра герметизации расположена герметичная камера ИК-нагрева, подключаемая через клапан к вакуумной сети при отжиге и к азотной сети при продувке. Данная камера предназначена для десорбции составляющих элементов конструкции непосредственно перед герметизацией и исключает контакт обрабатываемой аппаратуры с внешней атмосферой после отжига.

Система мониторинга влажности газовой среды внутри скафандра должна обеспечивать непрерывный контроль; значение влажности в скафандре в процессе работы должно обеспечивать на уровне 0,07 %.

При герметизации корпуса интегральной схемы совмещают крышку корпуса с основанием корпуса, проводят ИК-нагрев в инертной среде. Было установлено, что сборка ИС с использованием устройства ИК-нагрева с вакуумированием способствует снижению содержания подкорпусной влаги и составляет от 0,01 до 0,09 % объемных.

Наличие влаги на поверхности кристалла может вызвать одновременно несколько деградиционных процессов с преобладанием одного вида, чаще всего – коррозии (рисунок 1).

Появлению влаги в корпусе способствуют три основных фактора:

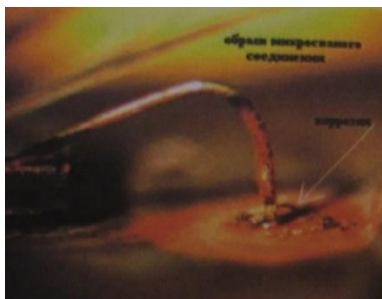
- среда герметизации;
- поглощенная и растворенная влага из герметизирующих материалов, крышки, и подложки, высвобождаемая в процессе герметизации;
- утечки внешней влаги через герметизирующее уплотнение (спай).

Появлению влаги в корпусе способствуют три основных фактора:

- среда герметизации;
- поглощенная и растворенная влага из герметизирующих материалов, крышки, и подложки, высвобождаемая в процессе герметизации;
- утечки внешней влаги через герметизирующее уплотнение (спай).



a



б

Рисунок 1 – Коррозия алюминиевой металлизации:

a – на контактных площадках кристалла;

б – на контактной площадке в месте приварки внутреннего вывода

Источники влаги в герметичных корпусах бывают внутренние и внешние. К внутренним источникам относится выделение влаги из клея и стеклоприпоя, влаги, хемо- и физически сорбированной в порах керамики и металлизации внутри корпуса ИС. К внешним источникам относится влага, натекающая через объем стеклоприпоя или другого материала, используемого для герметизации конструкции (рисунок 2).

В порах и микронеровностях алюмооксидной керамики, из которой изготавливается корпуса

ИС, всегда присутствует адсорбированная вода. Значительной пористостью обладает тугоплавкая металлизация корпуса, получаемая из пасты на основе порошков вольфрама или молибдена [1]. Размеры пор в керамике и частиц порошков вольфрама и молибдена достигают до 10 мкм.

Проведенными исследованиями установлено, что активация порошка при диспергации приводит к ускорению процесса спекания металлизационного покрытия, к припеканию ультрадисперсных частиц друг к другу и образованию закрытых полостей, куда не проникает стеклофаза керамики. Результатом становится несогласование друг с другом спекание керамики и металлизации, повышение пористости металлизации и снижение прочности металлокерамического слоя пленки и подложки [2].

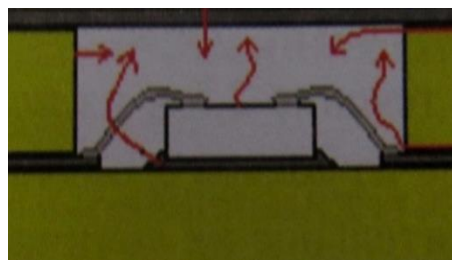


Рисунок 2 – Источники влагообразования в герметичном корпусе

Диагностика качества сборки интегральных схем, герметизация которых осуществляется с использованием устройства ИК-нагрева с вакуумированием включает ряд технологических и контрольных операций для выявления дефектности в процессе изготовления:

- термоциклирование проводится для проверки приборов на воздействие изменения температуры – определение способности микросхем сохранять внешний вид и электрические параметры после 10-кратного изменения температуры среды от минус (60 ± 3) до плюс (150 ± 5) °С. Приборы с дефектной конструкцией, выявленные при термоциклировании, отбраковываются на последующих операциях;

- испытания на воздействие линейного ускорения проводятся с целью проверки способности микросхемы противостоять разрушающему действию линейного ускорения;

- проверка герметичности микросхем в корпусе со свободным внутренним объемом – выявление негерметичных ИС путем обнаружения утечки введенного газа с критерием отбраковки по эквиваленту нормализованному потоку $6,65 \cdot 10^{-3}$ Па·см³/с;

- контроль внешнего вида – определение соответствия габаритных размеров и внешнего вида микросхем габаритному чертежу.

Не допускаются микросхемы имеющие: прожоги по краям крышки и ободка, приводящие к

нарушению целостности конструкции корпуса; выплески металла по контуру сварного шва, приводящие к увеличению габаритных размеров (контроль выполнять по торцам сварного шва с четырех сторон); выплески металла на выводах; непровары и пропуски сварных точек; трещины, сколы; смещение крышки за пределы ободка; отслаивание (скалывание) золотого покрытия с ободка корпуса; прожоги выводов; деформация выводов со следами перегибов и перекручивание; отслоение ободка от керамики корпуса.

В результате проведенной работы установлено, что наиболее универсальным для уменьшения содержания внутрикорпусной влаги является

технологический процесс герметизации шовной контактной сваркой в едином технологическом цикле с предварительной сваркой крышки с основанием.

Литература

1. Considération in the hermetic packages of hybrid microcircuits / M. Burnes [et al.] // Solid State Technology. – 1984. – Vol. 27, № 8. – P. 183–186.
2. Гаал И. Морфологические характеристики порошков вольфрама технической чистоты / И. Гаал, П.В. Макаров, К.Б. Новарова // Порошковая металлургия. – 1987. – № 6. – С. 4–11.

УДК 539.2

МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ СИЛУМИНА АЛ25 В ВОДЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРА НА АЛЮМОИТТРИЕВОМ ГРАНАТЕ В ДВУХИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ

Анисович А.Г.¹, Маркевич М.И.², Журавлева В.И.³, Щербакова Е.Н.⁴

¹Институт прикладной физики НАН Беларуси,

²ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»,

³Военная академия Республики Беларусь,

⁴Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены результаты исследования структуры силумина АЛ25 после воздействия лазера на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующего в двухимпульсном режиме, и последующего пребывания в водной среде 3 месяца. Исследования проводились на оптическом микроскопе. Показано, что в результате воздействия лазера на мишень из силумина образуется кратер, часть поверхности полируется лазерным лучом.

Ключевые слова: силумин, лазер на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D), структура.

SURFACE MORPHOLOGY OF A MIXED FABRIC MODIFIED BY CARBON AND TITANIUM CLUSTERS AFTER EXPOSURE TO LOW TEMPERATURES

Anisovich A.¹, Markevich M.², Zhuravleva V.³, Shcherbakova E.⁴

¹Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus

²Physical-technical Institute of the NAS of Belarus

³Military Academy of the Republic of Belarus

⁴Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The results of a study of the structure of silumin after exposure to a laser on an yttrium aluminum garnet (LS-2134D) with a wavelength of 1064 nm, generating in a two-pulse mode and subsequent exposure to an aqueous medium for 3 months are presented. The studies were carried out on optical microscopes.

Key words: silumin, yttrium aluminum garnet laser (LS-2134D), structure.

Адрес для переписки: Щербакова Е.Н., ул. Я. Коласа, 22, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: scherbakova@bntu.by

В последнее время в материаловедении развивается направление по формированию на поверхности твердых тел микро- и наноструктур. Формирование таких структур приводит к изменению тепловых, электрических, излучательных и других свойств поверхности материала [1]. Это востребовано в различных отраслях промышленности: селективном нанокатализе, микроэлектронике, записи информации. Для получения наноструктур может применяться ла-

зерное воздействие [1–3]. Сущность метода заключается в обработке поверхности твердого тела сфокусированным лазерным пучком.

Кроме того, в приборостроении, микроэлектронике востребованы технологии для удаления тонких слоев с использованием лазерных технологий, применяются различные методики. Для непрозрачных для лазерного излучения материалов воздействие производят непосредственно

на фронтальную поверхность, с которой удаляется слой вещества – фронтальная абляция.

Для удаления тонких слоев используются как наносекундные, так и фемтосекундные лазерные импульсы, однако механизм удаления материала при фронтальной абляции под действием нано- и фемтосекундных лазерных импульсов различен [1]. Для наносекундных импульсов превалирует механизм испарения материала мишени. Силумины – это сплав алюминия и кремния, за счет присутствия кремния сплав обладает повышенной прочностью и твердостью.

Целью работы являлась модификация структуры силумина путем обработки лазерным пучком в водной среде и последующей выдержкой в воде 90 суток.

В качестве мишени использовали силумин АЛ25. Размеры образцов: толщина ~ 20 мм, длина – 30 мм, ширина – 20 мм). В качестве среды, в которой находилась мишень, применяли дистиллированную воду. Жидкость принудительно не перемешивали. Для обработки материала использован лазер на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующий в двухимпульсном режиме (импульсы разделены временным интервалом 3 мкс, длительность импульсов 10 нс, частота следования импульсов 10 Гц, энергия одиночного импульса 0,05 Дж). Образцы обрабатывали лазерным излучением в интервале энергий 1500–1800 Дж при временах экспозиции от 25 до 30 мин. Для фотографирования и обработки использовался металлографический комплекс на основе металлографического инвертированного микроскопа МИ-1.

Микроструктура силумина представлена на рисунке 1. В соответствии с микроструктурой сплав представляет собой доэвтектический силумин – эвтектика по полю и кристаллы кремния, образовавшиеся в результате неравновесной кристаллизации.

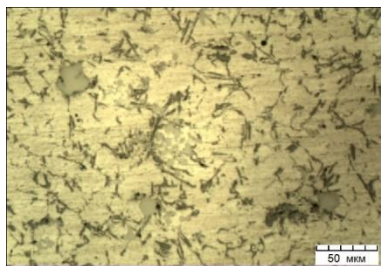


Рисунок 1 – Микроструктура силумина в исходном состоянии

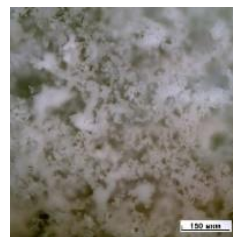
Образец обрабатывали лазерным излучением в интервале энергий – 1500 Дж при временах экспозиции от до 25 мин. Абляционная плазма, образованная в результате испарения силумина под действием первого импульса, создает в приповерхностном слое область с повышенной температурой и пониженной плотностью частиц воздуха,

что приводит к более полному использованию энергии второго импульса для лазерной абляции.

После первого импульса удаляется с поверхности окисная пленка алюминия и происходит взаимодействие поверхности с водой. На поверхности мишени образуется кратер в результате импульсного лазерного воздействия (рисунок 2, а; стрелка 1). После дальнейшего длительного пребывания в водной среде на поверхности образуется гидроксид алюминия (рисунок 2, б).

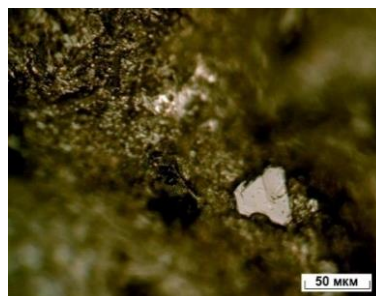


а

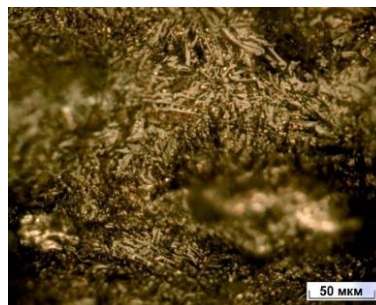


б

Рисунок 2 – Образец силумина: а – внешний вид; б – структура поверхности



а



б

Рисунок 3 – Структура силумина после воздействия лазера при вложенной энергии 1800 Дж, времени воздействия 30 мин

В процессе воздействия лазера часть поверхности претерпевает очистку, аналогичную таковой при травлении на микроструктуру (рисунок 2;

стрелка 2). При этом на поверхности видны кристаллы избыточного кремния (рисунок 3, а) и эвтектические кристаллы кремния (рисунок 3, б).

Выводы. Проведено структурирование и исследование поверхности силумина в процессе лазерного воздействия (лазер на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующий в двухимпульсном режиме (импульсы разделены временным интервалом 3 мкс, длительность импульсов 10 нс, частота следования импульсов 10 Гц, энергия одиночного импульса ~ 0,05 Дж) в водной среде и последующего пребывания в ней 3 месяца.

Показано, что в процессе воздействия лазера часть поверхности претерпевает очистку, при этом на поверхности видны кристаллы избыточного кремния и эвтектические кристаллы кремния.

Работа выполнена при поддержке Белорусского Фонда Фундаментальных исследований, проект № T23MH-003.

Литература

1. Ионин, А.А. Абляция поверхности материалов под действием ультракоротких лазерных импульсов / А.А. Ионин, С.И. Кудряшов, А.А. Самохин // УФН. – 2017. – Т. 187, № 2. – С. 159–172.
2. Маркевич, М.И. Структурные превращения в тонких металлических пленках при импульсном лазерном воздействии / М.И. Маркевич, А.М. Чапланов // Вестник Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук. – 2016. – № 1. – С. 28–35.
3. Markevich, M.I. In sulphurous liquids under action of shock waves / M.I. Markevich, F.A. Piskunov // High Power Laser Science and Engineering. – Czech R. NATO Advanced study institute: Karlovy Vary, 1995. – P. 49.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

<i>Magrupov T., Talatov Y., Magrupova M.</i> A SYSTEM FOR AUTOMATIC PROCESSING, ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF ECG CHARACTERISTICS TO DETERMINE VARIOUS STATES OF CARDIAC ANOMALIES	5
<i>Матвеев В.В.</i> ПОГРЕШНОСТИ БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ	8
<i>Луценко Е.В.</i> ПЕРСПЕКТИВЫ III-НИТРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ИХ РАЗВИТИЕ В БЕЛАРУСИ.....	10
<i>Козак Ю.В.</i> СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭТАЛОННОЙ БАЗЫ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ.....	12

Секция 1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ, ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА БЕЗОПАСНОСТИ

<i>Balukho I.N., Miritsky B.L., Intyakov A.N., Koltsov I.V., Dudchik Y.I., Kolchevsky N.N.</i> DETECTING RADIATION CONTAMINATION WITH QUADCOPTER	14
<i>Balukho I.N., Voika F.V., Beglik V.V., Kolchevsky N.N.</i> AIR AND SATELLITE TRAFFIC CONTROL AND TRACKING	16
<i>Адамович К.А., Веселовский В.А., Любинский К.А., Гулич А.Ю., Голубович А.И., Исаев А.В.</i> ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН.....	17
<i>Атаева О.Ч., Атаева Б.Х.</i> ИННОВАЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ	19
<i>Борисенок С.В., Тявловский А.К.</i> ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ПРЕДИКТИВНЫЕ ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В ВИРТУАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ	21
<i>Борисенок С.В., Тявловский А.К.</i> ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ	23
<i>Бочарова Д.В., Меркурьев А.В., Белов Д.А., Лавров Г.С., Курочкин В.Е.</i> ИЗУЧЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ В ГЕНЕТИЧЕСКОМ АНАЛИЗАТОРЕ НАНОФОР 05	25
<i>Борбат М.С., Самарина А.В., Пантелеев К.В., Тявловский А.К., Гусев О., Жарин А.Л.</i> МИГРАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЗАРЯДА ПОЛИЭТИЛЕНА ПОСЛЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ	27
<i>Бусько В.Н.</i> МЕТОДИКА И УСТРОЙСТВО ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБРАЗЦОВ НА УСТАЛОСТЬ С ЗАДАННЫМ АЛГОРИТМОМ НАГРУЖЕНИЯ.....	29
<i>Васильцов К.А., Казеко Д.Н., Баранова В.С., Лешкевич С.В., Саечников В.А.</i> РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМОЙ.....	31
<i>Воробей Р.И., Гусев О.К., Жарин А.Л., Микитевич В.А., Пантелеев К.В., Свистун А.И., Самарина А.В., Тявловский А.К., Тявловский К.Л.</i> ТЕСТИРОВАНИЕ И КАЛИБРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОВЕРХНОСТИ СО СТАТИЧЕСКИМ ЗОНДОМ	33
<i>Воропай Е.С., Евтухович П.Г., Коваленко М.Н., Павлов А.Л., Понарядов В.В., Рутковская Л.С.</i> РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО АМПЛИТУДНОГО АНАЛИЗАТОРА, ВСТРАИВАЕМОГО В FPGA ARTIX7 ПЛАТЫ ЭЛЕКТРОНИКИ СЧИТЫВАНИЯ ROESTI СТРОУ-ТРЕКЕРА ПРОЕКТА СОМЕТ	35

<i>Ворсин Н.Н.</i> МАНИПУЛЯТОР «ОПТИЧЕСКАЯ МЫШЬ» – ДАТЧИК ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В УЧЕБНЫХ ОПЫТАХ ПО ФИЗИКЕ	37
<i>Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Тявловский А.К., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И.</i> УПРАВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ С МНОГОЗАРЯДНОЙ ПРИМЕСЬЮ	39
<i>Гончаренко И.А., Ильющонок А.В., Рябцев В.Н.</i> ДЕТЕКТОРЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЩЕЛЕВЫХ ВОЛНОВОДОВ.....	41
<i>Громыко И.Л., Мирош Д.В., Монархович И.Е.</i> РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕЖВИТКОВЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ОДНОФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ	43
<i>Гусев О.К., Воробей Р.И., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И.</i> ВВЕДЕНИЕ ПРИМЕСИ-ПРИСАДКИ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫЙ СЛОЙ ПРИ ТВЕРДОФАЗНОМ ЛЕГИРОВАНИИ	45
<i>Дудчик Ю.И.</i> ПРЕЛОМЛЯЮЩАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ ОПТИКА ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ	47
<i>Здоровцев С.В., Кушнеров Д.П., Шевченко А.В.</i> ЦИФРОВОЙ ПОРТАТИВНЫЙ ТЕРМОГИГРОМЕТР С ВНЕШНИМ РАДИОИНТЕРФЕЙСОМ	49
<i>Ицков В.В., Ефремова Е.В., Кузьмин Л.В.</i> ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЮ ОБЪЕКТОВ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ХАОТИЧЕСКИХ РАДИОИМПУЛЬСОВ.....	51
<i>Карякин А.А., Карякина О.Е.</i> УСТРОЙСТВО ДЛЯ СКРИНИНГОВОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СЛИЗИСТОЙ ОБОЛОЧКИ РТА МЕТОДОМ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ СТОМАТОСКОПИИ.....	53
<i>Клявдо М.А., Савкова Е.Н.</i> ИНТЕГРАЦИЯ АДАПТИВНОГО ОСВЕЩЕНИЯ В СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗДАНИЯМИ.....	55
<i>Коробко Ю.С., Булыга Д.В.</i> ПРИМЕНЕНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ СИТ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	57
<i>Лисенков Б.Н.</i> ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ	58
<i>Малютин Д.М., Аносов Д.А.</i> ЗАРУБЕЖНЫЕ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ	60
<i>Мацук А.С., Савкова Е.Н.</i> ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	62
<i>Медведев Н.В.</i> ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ УЧЕТА ПОБОЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ	64
<i>Микитевич В.А., Борбат М.С., Пантелеев К.В., Воробей Р.И., Жарин А.Л.</i> АНАЛИЗ ЭФФЕКТОВ НАКОПЛЕНИЯ ЗАРЯДА В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛЕ В ПРОЦЕССЕ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	65
<i>Мирош Д.В., Громыко И.Л.</i> ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ, ПРИВОДЯЩИХ К НЕИСПРОВНОСТЯМ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И СПОСОБЫ ИХ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ.....	67
<i>Мисюкевич Н.С.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ	69
<i>Мороз А.С., Тявловский А.К., Тявловский К.Л., Воробей Р.И., Свистун А.И., Пантелеев К.В.</i> ПИТАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ОТ АВТОМОБИЛЬНОЙ БОРТСЕТИ.....	71
<i>Павлюковец Е.Ю., Кузнецик В.О., Чалевич А.Ю.</i> ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО АНЕМОУМБОМЕТРА НА ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ВЕТРА	73
<i>Пантелеев К.В., Микитевич В.А., Воробей Р.И., Свистун А.И., Крень А.П., Мацулевич О.В., Жарин А.Л.</i> АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТЕНЦИАЛЬНОГО РЕЛЬЕФА В УСЛОВИЯХ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ	75
<i>Савкова Е.Н.</i> ЭФФЕКТИВНЫЕ МОДЕЛИ ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ В ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ СРЕДАХ	77

<i>Савкова Е.Н., Прилуцкий И.В.</i> ТЕХНОЛОГИЯ МАСШТАБИРОВАНИЯ И ЛИНЕАРИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ	79
<i>Свистун А.И., Воробей Р.И., Гусев О.К., Тявловский А.К., Тявловский К.Л., Забогонский К.А., Шадурская Л.И.</i> ПРИБОРНЫЙ РЯД ОПТИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТОРЕКОМБИНАЦИОННОГО ЭФФЕКТА	81
<i>Сычик В.А., Шумило В.С., Уласюк Н.Н.</i> ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ХОЛОДИЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ	83
<i>Сычик В.А., Глухманчук В.В., Уласюк Н.Н.</i> СИНТЕЗ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ	85
<i>Сычик В.А., Русан В.И., Уласюк Н.Н.</i> ИСТОЧНИК ХОЛОДНОЙ ВОДЫ	87
<i>Сычик В.А., Уласюк Н.Н.</i> ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ СВЕТОДИОДНЫЙ ЭЛЕМЕНТ	89
<i>Тарасов Д.С., Самцов М.П., Радько А.Е., Красноперов Н.Н., Шевченко К.А., Воронай Е.С.</i> ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ «ФЛУОТАУ» ДЛЯ АНАЛИЗА КИНЕТИКИ ЗАТУХАНИЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ	91
<i>Чернов П.С.</i> ПОСТРОЕНИЕ ЗАЩИЩЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ	93
<i>Шарибаев Н.Ю., Юсупов Э.К., Махмудов Б.М., Холбоев Д.Ж.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВ	95
<i>Ясько Н.С., Тявловский А.К., Борисенко С.В., Микитевич В.А., Забогонский К.А.</i> РЕАЛИЗАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СИГНАЛА ЗОНДА КЕЛЬВИНА НА БАЗЕ ПЛИС ХІLІNХ	97
<i>Ясько Н.С., Тявловский А.К., Париза И.А., Микитевич В.А., Борисенко С.В.</i> ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ НА SOC ХІLІNХ ZYNQ7010	99
<i>Исаев А.В., Любинский К.А., Голубович А.И., Гулич А.Ю., Адамович К.А., Веселовский В.А.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗ ОТДЕЛЬНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКА ХОЛОСТОГО ХОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ	101

Секция 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

<i>Балухо И.Н., Дудчик Ю.И., Трапенко Н.В., Кольчевский Н.Н.</i> МЕТОДЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СЪЕМКИ В РЕНТГЕНОГРАФИИ	104
<i>Beglik V.V., Kolchevsky N.N., Ohrymenko I.P.</i> GRAVITATIONAL WAVE DETECTION SYSTEMS BASED ON SATELLITE CONSTELLATIONS	106
<i>Бобкова Е.Ю., Василевская Л.Н., Гавриленко О.О., Ксенофонтов М.А., Шкредова Н.А.</i> СПЕКТРАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ КАТИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И ФЕНОЛКАРБОНОВЫХ КИСЛОТ.	108
<i>Гуринович А.А., Давыдова Е.А.</i> ПРОБЛЕМЫ ВНУТРЕННИХ КОММУНИКАЦИЙ В СИСТЕМАХ МЕНЕДЖМЕНТА	110
<i>Дирша А.В., Соломахо В.Л.</i> ОСОБЕННОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА В УСЛОВИЯХ КАСТОМИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА	112
<i>Дубейко С.В., Коробко Ю., С. Сенюта В.В.</i> МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ КАЛИБРОВКЕ АКСЕЛЕРОМЕТРА	113
<i>Дубейко С.В., Коробко Ю.С.</i> МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТЬ КАЛИБРОВКИ АКСЕЛЕРОМЕТРА (МОДУЛЯ УСТРОЙСТВА TRIAX 2015)	115
<i>Дудяк А.И., Хвасько В.М.</i> ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ ДВУХОПОРНОЙ СОСТАВНОЙ БАЛКИ	117
<i>Пилипенко В.А., Ковальчук Н.С., Жигулин Д.В., Шестовский Д.В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА АЛЮМИНИЙ-ПОЛИКРЕМНИЙ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛИТЕЛЬНОГО И БЫСТРОГО ТЕРМИЧЕСКИХ ОТЖИГОВ МЕТОДОМ ЭНЕРГОДИСПЕРСИОННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО МИКРОАНАЛИЗА	119

<i>Крень А.П., Ланцман Г.А., Мацулевич О.В., Протасеня Т.А., Никифоров А.В., Делендик М.Н., Пантелеев К.В.</i> ОЦЕНКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ	121
<i>Крень А.П., Мацулевич О.В., Делендик М.Н., Гориченко С.Ф.</i> ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ИНДЕНТИРОВАНИЯ К ИЗМЕНЕНИЮ СОСТОЯНИЯ БИТУМА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ СТАРЕНИИ	123
<i>Ленкевич О.А.</i> МЕХАНИЗМЫ ПОВЫШЕНИЯ ВОВЛЕЧЕННОСТИ ПЕРСОНАЛА В СИСТЕМУ МЕНЕДЖМЕНТА ОРГАНИЗАЦИИ.....	125
<i>Пилипенко В.А., Омельченко А.А.</i> МОДЕЛЬ ТВЕРДОФАЗНОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕХАНИЧЕСКИ НАРУШЕННОГО СЛОЯ КРЕМНИЯ ПРИ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ	127
<i>Протасеня Т.А., Ланцман Г.А., Кутепов А.Ю.</i> ВЛИЯНИЯ ВИДОВ И РЕЖИМОВ ПОСТОБРАБОТКИ ОТВЕРЖДЕННЫХ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ СМОЛ НА УПРУГИЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ СТЕРЕОЛИТОГРАФИИ.....	129
<i>Рудагин Д.С., Серенков П.С.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ МЕТОДОВ КАЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА СВОЙСТВ ПРОДУКЦИИ.....	131
<i>Саечников И.В., Скакун В.В., Чернявская Э.А.</i> РЕГИСТРАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОБЪЕКТОВ SATDET ДЛЯ СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ.....	133
<i>Самохвал П.М., Врублевская Т.Н., Горошкевич П.В.</i> ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОСАНКИ В РАМКАХ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА	135
<i>Самохвал П.М., Врублевская Т.Н., Пешко П.А.</i> КОНЦЕПЦИЯ КАЧЕСТВА ЖИЗНИ, СВЯЗАННОГО СО ЗДОРОВЬЕМ	137
<i>Гуревич В.Л., Хейфец М.Л., Винтов Д.А.</i> ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПЕРВИЧНОЙ РЕФЕРЕНТНОЙ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ.....	139
<i>Горошкевич П.В., Врублевская Т.Н., Самохвал П.М.</i> МЕТОДЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ	141
<i>Сандомирский С.Г., Валько А.Л., Руденко С.П.</i> МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ТОЛЩИНЫ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ	143
<i>Сенюта В.В., Гомма М.А.</i> АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА НОРМИРОВАНИЯ И КООРДИНАТНОГО КОНТРОЛЯ В РАМКАХ ИНДУСТРИИ 4.0.....	145
<i>Сергиевич О.А., Попов Р.Ю., Богдан Е.О., Дятлова Е.М., Колонтаева Т.В.</i> ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ОГНЕУПОРНОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕСТНОГО ГЛИНИСТОГО СЫРЬЯ	147
<i>Сергиевич О.А., Попов Р.Ю., Колонтаева Т.В., Дятлова Е.М., Шевченко А.А.</i> КЕРАМИЧЕСКИЕ ТЕРМОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ И ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ	149
<i>Сернов С.П., Балохонов Д.В., Колонтаева Т.В., Тадэуш Н.Н., Коничева Л.М.</i> ИСПЫТАНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ К МЕХАНИЧЕСКОМУ ИЗНОСУ ПРИ СЕРТИФИКАЦИИ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ ДОРОГИ МЕХАНИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ	151
<i>Соколовский С.С., Алешевич Д.Д.</i> АНАЛИЗ НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ РАССТОЯНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОРОЖНЫХ КУРВИМЕТРОВ	153
<i>Соколовский С.С.</i> ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ОПЕРИРОВАНИЯ БАЗОЙ ДАННЫХ В РАМКАХ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕТОДИК ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ	155
<i>Соломахо В.Л., Цитович Б.В.</i> МЕСТО КАЛИБРОВКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ ЗАКОНОДАТЕЛЬНОЙ МЕТРОЛОГИИ	157
<i>Новицкая Е.Д., Спесивцева Ю.Б.</i> МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ СОВМЕСТИМОСТЬ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ	158

<i>Собиров С.С., Спасивцева Ю.Б.</i> ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОДСОЛНЕЧНОГО МАСЛА	161
<i>Волчок О.П., Спасивцева Ю.Б.</i> ОЦЕНИВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕВЫХ МЕР ДЛИНЫ 1 РАЗРЯДА	163
<i>Соломахо В.Л., Степанова Е.Л.</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛОМ ПУТЕМ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ	165
<i>Бринкевич Д.И., Гузов В.Д., Киевицкая А.И., Кийко А.А., Кийко А.Н., Бумай Ю.А.</i> ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРОМЕТРА МКС-АТ1315 ДЛЯ КОНТРОЛЯ РАДИОНУКЛИДОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА РАДИОФАРМПРЕПАРАТОВ	167
<i>Токарь О.В.</i> КВАЛИМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА НА ПРЕДПРИЯТИИ	169
<i>Третьякова Е.С., Хамко Ю.А.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КОНЦЕПЦИЙ КАК ФАКТОРА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ В СФЕРЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ	171
<i>Троцкая А.Э., Гомма М.А.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРЕХКООРДИНАТНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ПРОЦЕССЕ РЕ-ВЕРСНОЙ ИНЖЕНЕРИИ И СОЗДАНИЯ ТОЧНЫХ 3D-МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ	172
<i>Давыдова Е.А., Фильченко Н.Т.</i> АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫХ К ЭЛЕКТРОННЫМ СИСТЕМАМ ДОСТАВКИ НИКОТИНА И НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ТАБАКА В ХОДЕ КОНТРОЛЬНОЙ (НАДЗОРНОЙ) ДЕЯТЕЛЬНОСТИ	174
<i>Фурс М.С., Серенков П.С.</i> АКТУАЛЬНОСТЬ НАУЧНОГО РАЗВИТИЯ КОНЦЕПЦИИ «БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА» В РАМКАХ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ.....	176
<i>Буслюк В.В., Дереченник С.С., Оджаев В.Б., Просолович В.С., Ластовский С.Б., Нерода И.Ю., Федосюк Д.Н., Черный В.В., Янковский Ю.Н.</i> ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ НА ПАРАМЕТРЫ ДИОДОВ ГЕНЕРАТОРОВ ШУМА	178
<i>Чжан Ю., Савкова Е.Н.</i> ИЗМЕРЕНИЕ ОПАСНОСТИ СИНЕГО СВЕТА И АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ СМАРТФОНОВ.....	180
<i>Козаченков С.А., Соколов Д.А.</i> РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА ОТРАЖЕННОГО ЛУЧА	182
<i>Таратын И.А., Колонтаева Т.В., Дятлова Е.М., Хорт А.А., Бука А.В.</i> КЕРАМИКА ДЛЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДАТЧИКОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА	183

Секция 3. ФИЗИЧЕСКИЕ, ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ, МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

<i>Авринская А.</i> ДИЗАЙН-ПРОЕКТ АКАДЕМИЧЕСКОГО ЗНАКА БНТУ	186
<i>Balukho I.N., Dudchik Y.I., Kolchevsky N.N.</i> COLOUR VISUALIZATION METHOD OF X-RAY SPECTRA	187
<i>Бобученко Д.С.</i> АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ МНОГОСЛОЙНОЙ СРЕДЫ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ НАГРЕВЕ	189
<i>Бойправ О.В., Бозуш Н.В.</i> ТРЕХСЛОЙНЫЕ СИММЕТРИЧНЫЕ ЭЛАСТИЧНЫЕ И ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭКРАНЫ НА ОСНОВЕ ФОЛЬГИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ	191
<i>Бокуть Л.В., Деев Н.А.</i> АЛГОРИТМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ ПОЖАРНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ С КАНАЛОМ ОПОВЕЩЕНИЯ ПО НИЗКОВОЛЬТНЫМ СЕТЯМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	193
<i>Бокуть Л.В., Климович Т.А.</i> ПРИМЕНЕНИЕ ФУНКЦИЙ ЛЯПУНОВА К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОДОЛЖИМОСТИ РЕШЕНИЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ	195

<i>Видрицкий А.Э., Жамойть А.Е., Ланин В.Л.</i> МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ FLIP-CHIP В ПРОЦЕССЕ СБОРКИ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ	197
<i>Габец В.Л., Есьман, Г.А., Бондаренко В.А.</i> ПРИМЕНЕНИЕ БИОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В РЕАБИЛИТАЦИИ	199
<i>Бука А.В., Дятлова Е.М., Попов Р.Ю., Гундилович Н.Н., Колонтаева Т.В.</i> ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО МАНГАНИТА ЛАНТАНА	201
<i>Таратын И.А., Колонтаева Т.В., Дятлова Е.М., Хорт А.А., Бука А.В.</i> КЕРАМИКА ДЛЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДАТЧИКОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА	203
<i>Бурак В.А., Коваленок И.А., Протасевич А.С.</i> ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ ОБРАЗЦОВ НА ВЕЛИЧИНУ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ ПОСЛЕ ИМПУЛЬСНОГО НАМАГНИЧИВАНИЯ НАКЛАДНЫМ ДАТЧИКОМ	205
<i>Kotarov F., Parkhomenko I., Wang Ting, Milchanin O., Zhussupbekov K., Zhussupbekova A., Wendler E.</i> SILICON HYPERDOPED WITH SELENIUM FOR BROAD BAND INFRARED PHOTODETECTORS AND SOLAR CELLS	207
<i>Рыжневич А.А., Балыкин И.В., Варанецкий А.М., Казак Н.С.</i> ВЛИЯНИЕ АЗИМУТАЛЬНЫХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ УГЛА КОНУСНОСТИ АКЦИКОНА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ И ФУРЬЕ-СПЕКТР БЕССЕЛЕВА СВЕТОВОГО ПУЧКА	209
<i>Гацкевич Е.И.</i> РЕЛАКСАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИНТЕРФЕРИРУЮЩИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ПУЧКАМИ	211
<i>Денисюк С.В., Куданович О.Н., Ходин А.А., Уткина Е.А., Меледина М.В.</i> ПОЛУЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СЛОЕВ НА ОСНОВЕ ZnO МЕТОДОМ SILAR	213
<i>Грузд Н.А., Есьман Г.А., Габец В.Л.</i> ПРОТЕЗ ПРЕДПЛЕЧЬЯ С ИСКУССТВЕННЫМИ МЫШЦАМИ	215
<i>Гундина М.А., Кондратьева Н.А.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АССОЦИАЦИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ С ЛОГАРИФМАМИ	217
<i>Денис А., Луговой И.В.</i> МОДАЛЬНЫЙ И ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ КОНЦЕНТРАТОРОВ ОВОИДНОЙ ФОРМЫ	218
<i>Долгушин Я.В., Медвецкова В.М., Крит Б.Л.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОЙ СПОСОБНОСТИ СПЛАВА МАГНИЯ ПОСЛЕ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТНОЙ ОБРАБОТКИ	221
<i>Ефименко С.А., Швелёва А.А.</i> УГЛЕНАПОЛНЕННЫЙ ПЛАСТИК – МАТЕРИАЛ ДЛЯ УПАКОВКИ ИЗДЕЛИЙ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ	222
<i>Жамойть А.Е., Козодоев С.В., Занько А.И., Видрицкий А.Э.</i> ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТАКТА К СЛОЮ АЛЮМИНИЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ, ФОРМИРУЕМОЙ МЕТОДОМ ВЗРЫВНОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ	224
<i>Жевняк О.Г., Борздов А.В., Борздов В.М.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ ПАРАЗИТНОГО ТУННЕЛЬНОГО ТОКА В ЭЛЕМЕНТАХ ФЛЕШ-ПАМЯТИ	226
<i>Богдан П.С., Зайцева Е.Г., Степаненко А.И., Чайкова Л.Д.</i> ВОЗМОЖНОСТЬ ИМИТАЦИИ ЕСТЕСТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ ВАРЬИРОВАНИЕМ ПАРАМЕТРОВ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ	228
<i>Климович Т.А., Князев М.А.</i> ТОПОЛОГИЧЕСКИ НЕТРИВИАЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ АКСОНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ	230
<i>Кондратьева Н.А., Дудик С.А., Алексеенко Е.М.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ЮВЕЛИРНЫХ УКРАШЕНИЙ В ПРОГРАММЕ BLENDER 3D	232

<i>Константинов С.В., Комаров Ф.Ф., Чижов И.В., Зайков В.А.</i> ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ TiAlSiN, TiAlSiCN ДЛЯ ЗАДАЧ КОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ	234
<i>Кот В.А.</i> КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ТЕПЛОТВОДЯЩИХ СВОЙСТВ КОЛЬЦЕВЫХ РЕБЕР С ГИПЕРБОЛИЧЕСКИМ ПРОФИЛЕМ	236
<i>Ксенофонтов М.А., Васильева В.С., Выдумчик С.В., Павлюкевич Т.Г., Понарядов В.В.</i> ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРЕДИЗОЛИРОВАННЫХ ТРУБ	238
<i>Кулагин В.Н., Пиунов В.Д., Осипов А.А.</i> ВОЗМОЖНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МНОГОПАРАМЕТРОВЫХ МОДЕЛЕЙ	240
<i>Ланин В.Л., Хацкевич А.Д.</i> ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОКОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ 3D ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ	242
<i>Попов Р.А., Луговой В.П.</i> ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МАКУМЭ-ГАНЕ ДЛЯ МЕДНЫХ СПЛАВОВ	244
<i>Гундилович Н.Н., Дятлова Е.М., Бука А.В., Попов Р.Ю., Колонтаева Т.В.</i> СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КУПРАТОВ МЕТАЛЛОВ (II, IV)	246
<i>Прусова И.В., Прихач Н.К., Суходола А.А., Мамаджанова Е.Х.</i> МЕХАНИЗМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИОНОВ Sm ³⁺ В ИТРИЙ-АЛЮМОБОРАТНЫХ СТЕКЛАХ С СОСТАВОМ ВБЛИЗИ СТЕХИОМЕТРИИ ХАНТИТА	248
<i>Романчук В.М., Вязгина А.Ю.</i> ПРОБЛЕМА ИЗМЕРЕНИЯ КАЧЕСТВА И КОНЦЕПЦИЯ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	250
<i>Korzyuk V.I., Rudzko J.V.</i> MILD SOLUTION OF THE CAUCHY PROBLEM FOR A SEMILINEAR NONSTRICTLY HYPERBOLIC EQUATION ON A HALF-PLANE IN THE CASE OF A SINGLE CHARACTERISTIC	252
<i>Савченко А.Л., Минченя В.Т., Сатторов С., Непогода А.Ю.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМООБРАБОТКИ СТЕНТ-ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ НИТИНОЛА	254
<i>Савченко А.Л., Элмуротова Д.Б.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И МОДЕЛЕЙ ОРГАНОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭНДОПРОТЕЗОВ	256
<i>Савченко А.Л., Богдан П.С., Минченя В.Т., Сатторов С., Непогода А.Ю.</i> ВЛИЯНИЕ НАТЯЖЕНИЯ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ НА ЖЕСТКОСТЬ ОБРАЗЦОВ ИЗ НИТИНОЛА	258
<i>Антонюк В.Е., Яворский В.В., Сандомирский С.Г.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ УПРАВЛЯЕМОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МАЛОЖЕСТКИХ КОЛЕЦ	260
<i>Пилипчук А.П., Степаненко Д.А., Бурак В.А., Киндрок А.Н.</i> ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА АКУСТИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 65Г	262
<i>Попов Р.Ю., Дятлова Е.М., Пантелеенко Ф.И., Самсонова А.С., Драенкова Е.Ю.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГЛИНИСТЫХ КОМПОНЕНТОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕРМОСТОЙКИХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКОГО ВОЛЛАСТОНИТА	264
<i>Степаненко Д.А., Мудинов И., Билейчик А.А., Охремчик В.А.</i> ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПЛАСТИН ДЛЯ ОСТЕОСИНТЕЗА	266
<i>Олешкевич А.Н., Хомич А.В., Сернов С.П., Нгуен Тхи Тхань Бинь, Лапчук Т.М., Лапчук Н.М.</i> ЭЛЕКТРОННЫЙ ПАРАМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ДЕЙТЕРИЯ И ОТОЖЖЕННЫХ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 1665 °С ПЛЕНКАХ CVD АЛМАЗА	268
<i>Степаненко Д.А., Коляда Е.А., Запольская К.В.</i> ПРОЦЕССЫ ГИДРОКСИЛИРОВАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ДАТИРОВКИ АРХЕОЛОГИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ	270

<i>Степаненко Д.А., Еромин Е.С.</i> ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКОЙ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	272
<i>Горячев О.В., Ефромеев А.Г., Степочкин А.О.</i> СИНТЕЗ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА ЭЛЕКТРОПРИВОДА С МОМЕНТНЫМ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ	274
<i>Чернышев А.В., Шарандо В.И., Кременькова Н.В., Пиунов В.Д.</i> ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ РАЗНОТОЛЩИННОЙ ЛИСТОВОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т	276
<i>Телеш Е.В., Гутенко Н.Д., Данилович С.В.</i> ИОННО-ПУЧКОВЫЙ СИНТЕЗ ПРОЗРАЧНЫХ МЕДНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ	278
<i>Телеш Е.В., Шевчик Е.В., Потылкин А.Н.</i> ФОРМИРОВАНИЕ ФТОРУГЛЕРОДНЫХ ЗАЩИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ	280
<i>Трапенко Н.В., Балуха И.Н., Дудчик Ю.И., Кольчевский Н.Н.</i> РАСПОЗНАВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА В УСЛОВИЯХ МАЛЫХ ПОТОКОВ ФОТОНОВ.....	282
<i>Третьякова Е.С., Тришина С.Л.</i> ЦИФРОВОЕ РАЗВИТИЕ В ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ В СФЕРЕ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ПРИБОРОСТРОЕНИЯ	284
<i>Храмкова А.С., Монич С.Г.</i> 3D-ПЕЧАТЬ В ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ОРГАНОВ	286
<i>Монич С.Г., Храмкова А.С., Бондаренко В.А.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ДЕНТАЛЬНОЙ ИМПЛАНТОЛОГИИ.....	288
<i>Бринкевич Д.И., Просолович В.С., Черный В.В., Вабищевич С.А., Вабищевич Н.В.</i> ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ДИАЗОХИНОННОВОЛАЧНОГО ФОТОРЕЗИСТА ФП9120, ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ СЕРЕБРА	290
<i>Шевель Н.А., Бурак В.А., Лукьянчиков Е.А.</i> АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС В КОНСТРУКЦИИ ПО-ЛИГРАФИЧЕСКОГО ПЕЧАТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	292
<i>Горох Г.Г., Федосенко В.С., Таратын И.А.</i> ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАССИВОВ НАНОПРОВОДОВ АНТИМОНИДА ИНДИЯ В МАТРИЦАХ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ	294
<i>Гольцев М.В., Белая О.Н., Шепелевич В.Г.</i> СТРУКТУРА И МИКРОТВЕРДОСТЬ ТРОЙНОГО СПЛАВА $Vi-19$ МАСС.% $Sn-28$ МАСС.% In	296
<i>Горох Г.Г., Тураходжаев Н.Д., Худойкулов Ш.У., Федосенко В.С., Таратын И.А.</i> ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ПЛЕНКАМИ ПОРИСТЫХ МАТРИЦ.....	298
<i>Ризноокая Н.Н., Касьмин В.Ю.</i> ДИНАМИКА СВОБОДНЫХ КАЧАНИЙ ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАГРУЗКАХ	300

Секция 4. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

<i>Алексеев В.А., Усольцева А.В., Усольцев В.П., Юран С.И.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ	302
<i>Антошин А.А., Третьяк И.Б.</i> КОНСТРУКЦИЯ ТОЧЕЧНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ДЫМОВЫХ ПОЖАРНЫХ ИЗВЕЩАТЕЛЕЙ И ЛОЖНЫЕ СРАБАТЫВАНИЯ.....	304
<i>Артюхина Н.К., Алешкевич К.В., Стуканова В.А., Самбрано Лус Фабиола</i> ЗЕРКАЛЬНЫЕ КОНЦЕНТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С РАЗЛИЧНЫМ ЧИСЛОМ ОТРАЖЕНИЙ	306
<i>Баранова В.С., Лешкевич С.В., Спиридонов А.А., Ушаков Д.В., Саечников В.А.</i> ОБНАРУЖЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ СЛЕЖЕНИЯ.....	308
<i>Барцевич А.М., Фёдорцев Р.В., Семченок А.В.</i> ВРАЩАЮЩЕЕСЯ КОНТАКТНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПАНОРАМНОГО ПРИЦЕЛА.....	310
<i>Горбач Д.В., Величко К.Г.</i> РАЗРАБОТКА КОМПАКТНОЙ КОНСТРУКЦИИ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО МИКРОСКОПА	312

<i>Воропай Е.С., Ермалицкая К.Ф., Тризнюк Е.Л.</i> ЛАЗЕРНАЯ АТОМНО-ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ БИООБЪЕКТОВ И ПОРИСТЫХ ТЕЛ	314
<i>Гавриш С.В., Потапенко А.О., Шапковский С.Г.</i> ИМПУЛЬСНАЯ КОРОТКОДУГОВАЯ ТРЕХЭЛЕКТРОДНАЯ ГАЗОРАЗРЯДНАЯ ЛАМПА ДЛЯ ОПТИКОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ УФ-ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ	316
<i>Галюк К.А., Овчаренко Б.Д., Букин В.В., Ушаков А.А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО КВАНТРОНА С ПОПЕРЕЧНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ АКТИВНОЙ СРЕДЫ Nd ³⁺ :YAG.....	318
<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.....	320
<i>Maltsev V.V., Volkova E.A., Kaporulina E.V., Mitina D.D., Kosorukov V.L., Jiliaeva A.I., Naprasnikov D.A., Gorbachenya K.N., Kisel V.E.</i> Er,Yb:ReGa ₃ (BO ₃) ₄ (Re = Y, Gd) LASER CRYSTALS	322
<i>Лазарчук А.И., Горбаченя К.Н., Кисель В.Э.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛОВ Yb ³⁺ :Gd _{1-x} Y _x VO ₄ В РЕЖИМЕ СИНХРОНИЗАЦИИ МОД НА КЕРРОВСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ	324
<i>Гусаров И.Е., Калугин А.И., Соболев К.К.</i> ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО СКАНЕРА НА УШИРЕНИЕ ПРОЕКЦИИ ЛАЗЕРНОГО ПЯТНА	326
<i>Ивуть П.В., Щербаков Н.Г., Гуторов А.В., Ломако А.А., Голубев Ю.В., Беляев Б.И., Сосенко В.А., Литвинович Г.С., Хомицевич А.Д.</i> ОПЫТНЫЙ ОБРАЗЕЦ ВЫСОТНОГО КАЛИБРОВОЧНОГО ПУНКТА ДЛЯ КАЛИБРОВКИ СПУТНИКОВЫХ СЕНСОРОВ И ВАЛИДАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ.....	328
<i>Фёдорцев Р.В., Орехов К.А., Орехова В.Е., Серов М.П., Позднякова О.М.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДОПУСТИМЫХ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ВО ВНУТРЕННЕМ ОБЪЕМЕ ЛАЗЕРНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЛАЗЕРНЫХ ПЕРЕДАЮЩИХ БЛОКОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ	330
<i>Кисель В.Э., Горбаченя К.Н., Гоман В.И.</i> УСЛОВИЯ И РЕЖИМЫ ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ МАГНИЙ-АЛЮМИНИЕВОЙ ШПИНЕЛИ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ Co ²⁺ С РАЗЛИЧНОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ, И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ИМПУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРАХ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ	332
<i>Кисель В.Э., Горбаченя К.Н., Гурецкий С.А., Кулешов Н.В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОСЛЕРОСТОВОГО ОТЖИГА КРИСТАЛЛОВ РЕДКОЗЕМЬНЫХ ВОЛЬФРАМАТОВ С ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ИТТЕРБИЯ НА ИХ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОПТИЧЕСКОЕ КАЧЕСТВО.....	334
<i>Книга И.В., Маляревич А.М.</i> ТВ-КАНАЛ ДАЛЬНОМЕРА ВИДИМОГО И БЛИЖНЕГО ИК ДИАПАЗОНОВ	336
<i>Варакса Ю.А., Кунц А.В., Кузнецик В.О.</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ LiTaO ₃ С ГЕОМЕТРИЕЙ, ОТЛИЧНОЙ ОТ ИДЕАЛЬНОЙ	337
<i>Лазарчук А.И., Кисель В.Э., Ясюкевич А.С., Гоман В.И.</i> СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ Yb:Gd _{1.615} Y _{0.385} SiO ₅	339
<i>Домарацкий А.В., Литвинович Г.С., Хомицевич А.Д., Беляев Б.И.</i> СПЕКТРОМЕТР ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА МАЛЫХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ С МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	341
<i>Град Д.В., Лишик С.И., Челябин А.Е., Фан Ц.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ ФАРЫ (ПРОЖЕКТОРА)	343
<i>Острецов Е.Ф., Цвирко В.И., Лишик С.И.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ CdS/CdSe КВАНТОВЫХ СТЕРЖНЕЙ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ УСТРОЙСТВ	345
<i>Луцкович З.М., Лапковский А.С., Фёдорцев Р.В.</i> МОДУЛЬ АВТОФОКУСИРОВКИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ	347
<i>Макаревич А.П., Варанецкий А.М.</i> ФОРМИРОВАТЕЛЬ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА БЕССЕЛЕВА ТИПА С ЗАДАНЫМ ПРОФИЛЕМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ.....	349

<i>Мандик Н.С., Фёдоров Р.В., Нупрейчик А.О.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ПОТЕРЬ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ УПРАВЛЯЮЩЕГО СИГНАЛА В ДАЛЬНОМЕРНОМ КАНАЛЕ ТАНКОВОГО ПРИЦЕЛА	351
<i>Козерук А.С., Михалкович Р.Р., Неменёнок А.И.</i> ЛАЗЕРНО-ЛУЧЕВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОТИВОТАНКОВОЙ РАКЕТОЙ.....	353
<i>Кочурова Д.Н., Калугин А.И., Антонов Е.А., Сапожников П.А.</i> ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА ДАЛЬНОСТНЫЙ ПОРТРЕТ В ЛАЗЕРНЫХ ЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ	354
<i>Назаренко П.Н.</i> АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ АМПЛИТУДНЫХ ПРОФИЛЕЙ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ЗОНДИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛИДАРАХ-ОБЛАКОМЕРАХ	356
<i>Неваев А.Е., Войтов А.С.</i> ДИХРОИЧНОЕ ЗЕРКАЛО В ПРИБОРЕ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ.....	358
<i>Орехова В.Е., Кисель В.Э., Орехов К.А.</i> ХАРАКТЕРИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ND:YAG ЛАЗЕРА В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	360
<i>Петухов И.Б., Ретюхин Г.Е.</i> ПРЕЦИЗИОННОЕ ЛАЗЕРНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ СТРУКТУР НА ПЛАСТИНАХ САПФИРА.....	362
<i>Поляков А.В., Ксенофонтов М.А., Каваленя А.А.</i> РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МЕЖМОДОВОЙ ДИСПЕРСИИ В МНОГОМОДОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ	364
<i>Саечников А.В., Чернявская Э.А., Саечников В.А.</i> РЕГИСТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОДНОЙ СРЕДЫ ОПТИЧЕСКИ СВЯЗАННЫМИ МИКРОРЕЗОНАТОРАМИ	366
<i>Вакалов Д.С., Чукулина И.С., Кичук С.Н.</i> ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ КЕРАМИКИ СОСТАВА YAG:Yb, Er НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ	368
<i>Филонова М.И., Козерук А.С., Попкович А.И., Якубович А.Д., Диас Гонсалес Р.О.</i> ГРУППОВОЙ МЕТОД ФОРМООБРАЗОВАНИЯ КОНИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТЕКЛА ПЛОСКИМ ИНСТРУМЕНТОМ	370
<i>Цвирко В.И., Острецов Е.Ф., Лишик С.И.</i> СВЕТОДИОДНЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ИМИТАТОРА ДНЕВНОГО СВЕТА D50	372
<i>Челятин А.Е., Трофимов Ю.В., Захарова Н.А., Асиненко Д.А.</i> АВТОНОМНАЯ СВЕТОДИОДНАЯ ЛОВУШКА НАСЕКОМЫХ ВРЕДИТЕЛЕЙ С ПИТАНИЕМ ОТ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	374
<i>Челятин А.Е., Острецов Е.Ф., Лишик С.И.</i> ОСВЕТИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО НА ОСНОВЕ ЛЮМИНОФОРНЫХ СВЕТОДИОДОВ ДЛЯ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ И ПРОИЗВОДСТВ	376
<i>Артюхина Н.К., Чергейко С.В., Шанчук В.А.</i> АНАЛИЗ МЕТОДИК АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА ОБЪЕКТИВОВ С ПЕРЕМЕННЫМ ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ ДЛЯ ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА	377
<i>Шишко Т.А., Лазарчук А.И., Ясюкевич А.С., Кисель В.Э.</i> ИТТЕРБИЕВЫЙ ПЕТЛЕВОЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР В РЕЖИМЕ СИНХРОНИЗАЦИИ МОД.....	379
<i>Щербаков Н.Г., Ивуть П.В., Сосенко В.А.</i> ЭЛЕКТРОННЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ПРИБОРА С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ TSD1304DG	381
<i>Юдыцкая К.С., Лешкевич С.В., Саечников В.А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОПТИЧЕСКИХ КОММУНИКАЦИЙ ДЛЯ УНИВЕРСИТЕТСКОГО НАНОСПУТНИКА	383
<i>Козерук А.С., Кузнечик В.О., Шевченко В.П., Якубович Т.С.</i> ДВУСТОРОННЯЯ ОБРАБОТКА ДВОЯКОВЫПУСКЛЫХ ЛИНЗ.....	385
<i>Ясюкевич А.С., Кисель В.Э., Шишко Т.А., Трусова Е.Е., Захаревич Г.Б.</i> СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ФАЗЫ В СВИНЦОВО-ГЕРМАНАТНЫХ ОКСИФТОРИДНЫХ СТЕКЛАХ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ ИТТЕРБИЯ И ЭРБИЯ	387
<i>Юмашев К. В., Герцова А.В., Маляревич А.М.</i> ЭФФЕКТ ПРОДОЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ АКТИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ МОНОКЛИННОГО КРИСТАЛЛА ИТТРИЕВОГО ОКСИОРТОСИЛИКАТА.....	389

<i>Юмашев К.В., Хорт А.А., Подболотов К.Б., Шиманский В.И.</i> КИНЕТИКА ЗАТУХАНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ ИТТРИЙ (ЛЮТЕЦИЙ)-АЛЮМИНИЕВОГО ГРАНАТОВ И АЛЮМИНАТА ГАДОЛИНИЯ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ ЕВРОПИЯ	393
<i>Свирина Л.П.</i> ХАОТИЧЕСКИЕ И СТОХАСТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ГЕНЕРАЦИИ В ЛАЗЕРАХ С АНИЗОТРОПНЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ	395
<i>Жук Ю.А., Фёдорцев Р.В., Леванович А.М., Масловский В.А.</i> РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО МИКРОСКОПА	397
<i>Масловский В.А., Жук Ю.А., Побожный А.А., Фёдорцев Р.В., Савельева Е.В.</i> ШИРОКОПОЛЬНЫЙ АВТОКОЛЛИМАТОР ДЛЯ ПРИЦЕЛЬНО-ВИЗИРНОГО УСТРОЙСТВА	399
<i>Артюхина Н.К., Бурдо М., Побожный А.А.</i> МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕПЛОВИЗИОННОГО МОДУЛЯ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТИВА.....	402

Секция 5. МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ И СИСТЕМЫ

<i>Люцко К.С., Абмётко Н.В.</i> АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ДЫХАНИЯ НА ОСНОВЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ	404
<i>Берник Т.С., Хлебникова Е.В.</i> ПОВЫШЕНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ ОПТИЧЕСКИХ ЭНКОДЕРОВ	406
<i>Люцко К.С., Гайкевич Д.Н.</i> МЭМС-ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ	408
<i>Галацевич В.В., Петухов И.Б.</i> ПРИМЕНЕНИЕ АЗОТОВОДОРОДНОЙ СМЕСИ В ТЕХНОЛОГИИ МОНТАЖА КРИСТАЛЛОВ И ПРОВОЛОЧНЫХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ В ИЗДЕЛИЯХ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ.....	409
<i>Довгаль М.И., Люцко К.С.</i> ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ С ЕМКОСТНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ	411
<i>Корякин С.В., Михалёнок Е.В., Шарко С.А.</i> МАКЕТ БИОСЕНСОРА НА ОСНОВЕ ГЛЮКОЗООКСИДАЗЫ	413
<i>Кудина А.В., Габец В.Л., Франко Е.П.</i> МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ БИОНИЧЕСКИМИ ПРОТЕЗАМИ ВЕРХНИХ И НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ	415
<i>Латицкая В.А., Хабарова А.В., Холод В.М., Гринчук П.С., Углов В.В., Чижик С.А.</i> ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАРБИДОКРЕМНИЕВОЙ КЕРАМИКИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИОНОВ He И Kr	417
<i>Трухан Р.Э., Латицкая В.А., Хабарова А.В., Соловьёв Я.А., Чижик С.А.</i> СТРУКТУРА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК Ni-Pt-V НА КРЕМНИИ ПОСЛЕ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	419
<i>Таратын И.А., Реутская О.Г., Горох Г.Г., Федосенко В.С.</i> ДВУХСЕНСОРНАЯ ГАЗОВАЯ МИКРОСИСТЕМА НА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЕ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	421
<i>Хабарова А.В., Латицкая В.А., Кузнецова Т.А., Вахолинский Б., Чижик С.А., Гилевич А.</i> ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ ПОКРЫТИЙ Zr(C)N.....	423
<i>Литвинова А.В., Ефименко С.А.</i> ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ GAN-ПРИБОРОВ	425
<i>Люцко К.С., Крук А.Д.</i> ДАТЧИКИ ДВИЖЕНИЯ.....	427
<i>Люцко К.С., Филатов С.А.</i> МУЛЬТИСЕНСОРНАЯ СИСТЕМА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ БИОАЭРОЗОЛЕЙ.....	428
<i>Подвицкий Н.В., Люцко К.С.</i> ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ В МИКРО- И НАНОТЕХНИКЕ	430

<i>Реутская О.Г., Таратын И.А., Осипов А.Н., Горох Г.Г.</i> ДВУХЭЛЕКТРОДНЫЙ ВЫСОКОСЕЛЕКТИВНЫЙ СЕНСОР ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ МОНООКСИДА УГЛЕРОДА	433
<i>Люцко К.С., Россоловский А.Ю.</i> МЕМБРАННЫЕ БИОСЕНСОРЫ	435
<i>Соловьев А.А., Певцов Е.Ф.</i> МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ЛОГИЧЕСКИЙ ВЕНТИЛЬ С ДВУМЯ ПАРАМИ ИСТОК/СТОК И РАЗДЕЛЕННЫМ УПРАВЛЯЮЩИМ ЭЛЕКТРОДОМ	437
<i>Баранова А.С., Мельникова Г.Б., Довгаль М.И., Сапсалёв Д.В., Аксючиц А.В., Толстая Т.Н., Котов Д.А., Чижик С.А.</i> ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СЛОИ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛА ДЛЯ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	439
<i>Мельникова Г.Б., Толстая Т.Н., Сапсалёв Д.В., Корольков И.В., Жуманазар Н.Н. Чижик С.А., Здоровец М.В.</i> НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ЛЕНГМЮРА–БЛОДЖЕТТ ПЛЕНОК ПЕРФТОРОКТАДЕКАНОВОЙ КИСЛОТЫ ДЛЯ ГИБКИХ ДАТЧИКОВ АНАЛИЗА ИОНОВ СВИНЦА В ВОДЕ	441
<i>Некрашевич Д.А., Щербакова Е.Н.</i> ДИАГНОСТИКА КАЧЕСТВА СБОРКИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТРОЙСТВА ИК-НАГРЕВА И ВАКУУМИРОВАНИЯ	443
<i>Анисович А.Г., Маркевич М.И., Журавлева В.И., Щербакова Е.Н.</i> МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ СИЛУМИНА АЛ25 В ВОДЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРА НА АЛЮМОИТТРИЕВОМ ГРАНАТЕ В ДВУХИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ	445

Научное издание

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ – 2023

Материалы
16-й Международной научно-технической конференции

15–17 ноября 2023 года
Минск, Республика Беларусь

Ответственный за выпуск *Н. Н. Ризноокая*
Оформление и компьютерная верстка *И. А. Паризы, К. А. Забогонского, Д. Ю. Красневского*

Подписано в печать 13.11.2023. Формат 60×84 ¹/₈. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 53,48. Уч.-изд. л. 46,83. Тираж 60. Заказ 956.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.