



УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ГРОДНЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ЯНКИ КУПАЛЫ»
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Научное электронное издание

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Материалы
XXVIII международной
научно-практической конференции
аспирантов, магистрантов и студентов

(Гродно, 17 апреля 2020 г.)

Гродно
ГрГУ им. Янки Купалы
2020

УДК 538.9
ББК 22.3
Ф50

Редакционная коллегия:

*А. Е. Герман (гл. ред.), В. А. Лиопо, А. В. Никитин,
С. С. Ануфрик, Н. Д. Стрекаль, А. А. Маскевич*

Издаётся в авторской редакции
Ответственный за выпуск *А. В. Лавыш*
Компьютерная вёрстка: *Н. П. Уласевич*
Дизайн упаковки: *А. Е. Герман*

Руководитель редакции *Е. А. Смирнова*
Техническое редактирование: *М. В. Вахмянина,
И. П. Зимницкая, А. И. Соболева*

Физика конденсированного состояния [Электрон. ресурс] : материалы XXVIII междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов (Гродно, 17 апр. 2020 г.) / ГрГУ им. Янки Купалы, физ.-техн. фак. ; редкол.: А. Е. Герман (гл. ред.) [и др.]. – Объём электрон. дан. 68,0 Мбайт. – 32,0 уч.-изд. л. – Гродно : ГрГУ, 2020. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Тираж 68 экз. – Заказ 032.

ISBN 978-985-582-347-7

Рассматриваются проблемы, отражающие связи между молекулярной структурой, составом, дефектностью и физическими свойствами различных веществ, конденсированных состояний в технике, и вопросы, связанные с методикой изучения физики конденсированного состояния. Адресовано всем интересующимся вышеуказанными проблемами.

УДК 538.9
ББК 22.3

Издатель и изготовитель:

учреждение образования

«Гродненский государственный университет имени Янки Купалы».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,

изготовителя, распространителя печатных изданий

№ 1/261 от 02.04.2014.

Ул. Ожешко, д. 22, 230023, Гродно.

Республика Беларусь; www.grsu.by.

ISBN 978-985-582-347-7

© Учреждение образования
«Гродненский государственный университет
имени Янки Купалы», 2020

Секция 1

ИЗУЧЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ
КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 539.1

NGUYEN QUANG SAN

QUANTUM EFFECTS FOR CHANNELING IN A BENT CRYSTAL

Quantum mechanical theory for channeling of the relativistic charged particles in the bent crystals is considered in this report. The efficiency of channeling of the particles and their angular distribution at the exit crystal surface are calculated. Characteristic experimental parameters for observation the quantum effects are estimated.

At present, the channeling effect is widely used to control beams of charged particles. At the same time, the accuracy of the experimental study of the characteristics of this process has significantly increased. In this regard, it is of great interest to analyze the effects that are related to the under-barrier tunneling of particles, which leads to their exit from the channeling mode.

Let us consider the quadratic Dirac equation for a particle with energy E and mass $m \ll E$ in a crystal ($\hbar = c = 1$) up to second-order terms in potential [1]:

$$\left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + E^2 - m^2 + 2EV(\vec{r}) \right\} \Psi(\vec{r}) = 0 \quad (1)$$

The averaged potential of the crystallographic planes of a bent crystal has cylindrical symmetry [2] and is described by a function of the following form:

$$V(r) = \sum_{n=-n_1}^{n_1} V_1(r - R - nd),$$

where $V_1(r - R - nd)$ is the potential of a single plane; R is the curvature radius of the central channel, $2n_1$ is the number of crystallographic planes in the direction perpendicular to the bend; $d \ll R$ is the interplane distance.

The solution of equation (1) has form:

$$\Psi(\vec{r}) = \frac{u(r)}{\sqrt{r}} \exp[i(l\phi + p_z z)]; \quad l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

With a radial variable $x = r - R$; $|x| \ll R$ and the condition $|V(r)| \ll E$ we obtain the equation for the function $u(r)$ in the form of the Schrödinger equation [3]:

$$\left\{ -\frac{d^2}{dx^2} + 2E_0 V_{eff}(x) \right\} u(x) = \varepsilon u(x).$$

The eigenvalue for the total energy of the particle is determined by the quantum numbers l , p_z and the radial motion energy ε in the effective potential field $V_{eff}(x)$:

$$E \approx E_0 + \varepsilon; \quad E_0^2 = m^2 + p_z^2 + \frac{l^2 - 1/4}{R^2}; \quad (2)$$

$$V_{eff}(x) = V(x) + \frac{p_0^2}{E_0 R} x = V(x) + \frac{p_0 V}{R} x; \quad p_0 = \sqrt{E_0^2 - m^2 - p_z^2}$$

with $v = \frac{p_0}{E_0}$ as the particle velocity.

The condition for the appearance of a bound state of a particle in the channel: the potential energy $V_{eff}(x)$ must have a minimum in the interval $-d/2 \leq x \leq d/2$. From (2) we obtain:

$$-|V'(x)|_{\max} + \frac{p_0 v}{R} \leq 0 \quad (3)$$

$$R \geq \frac{p_0 v}{|V'(x)|_{\max}} \equiv R_{cr} \quad (4)$$

To illustrate further results, we consider a silicon crystal Si bent along the (110) planes ($d = 1.92 \text{ \AA}$) and use the Peshl–Teller potential with $E_0 = 70 \text{ GeV}$:

$$V_1(x) = a_{PT} \tanh^2(x / b_{PT}), \quad (5)$$

with parameters $a_{PT} = 23 \text{ eV}$, $b_{PT} = 0.145d$ and $V'_{1\max} = 6.37 \text{ GeV/cm}$.

With the above parameters, $R_{cr} \approx 11.01 \text{ cm}$. Then one can choose for example $R = 12.01 \text{ cm}$ and build $V_{eff}(x)$ (figure 1). Where the point x' is found from the matching condition $V_1(x') = V_2(x')$ and $\Delta V = V_{\max}(x_1) - V_{\min}(x_0)$.

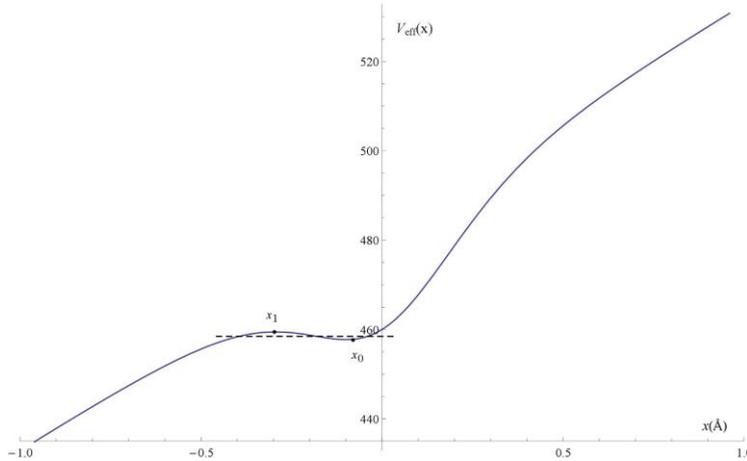


Figure 1 – Effective potential for the particle in the bent crystal

$$V_{eff}(x) \approx \begin{cases} V_1 = \frac{1}{2} V''(x_0)(x - x_0)^2; & x' < x < x_0 \\ V_2 = \Delta V - \frac{1}{2} |V''(x_1)|(x - x_1)^2; & x < x' \end{cases} \quad (6)$$

For potential (6), quasi-stationary energy levels of a particle in a bent channel are determined by the formula

$$\varepsilon_k \approx \omega \left(k + \frac{1}{2} \right) - i\Gamma_k / 2 \equiv \varepsilon_k^{(0)} - i\Gamma_k / 2; \quad \omega = \left[\frac{V'(x_0)}{E_0} \right]^{1/2} \quad (7)$$

The width Γ_k of the level can be found by using the quasi-classical expression for the penetration coefficient of the potential barrier [4]:

$$\Gamma_k \equiv A\omega \exp \left[-2 \int_b^a \sqrt{2E_0(V_{eff}(x) - \varepsilon_k^{(0)})} dx \right]. \quad (8)$$

where $A \approx 1$ is the pre-exponential factor, and two turning points a and b are determined by the relation:

$$a, b = x_1 \pm \sqrt{\frac{2\Delta V - (2k+1) \sqrt{\frac{V''(x_0)}{E_0}}}{|V''(x_1)|}}.$$

Maximal number of the levels corresponding to the particle bound states is defined by the condition:

$$k_{\max} < \frac{\Delta V}{\omega} - \frac{1}{2}.$$

A particle trapped in a bent channel at level number k remains at it when moving through the entire crystal of length L , if the following condition is fulfilled:

$$\Gamma_k L \ll 1. \quad (9)$$

It allows one to introduce the characteristic value $L_k \approx 1/\Gamma_k$ as the distance which the particle at the k -th bound level moves being captured in the bent channel. This length should be taken into account only for the levels close to the top of the barrier. Its values strongly depend on the particle energy and also presented in Table 1.

Table 1 – Parameters of the bound states for particle in the bent channel

$E_0(\text{GeV})$	ω (eV)	k	Γ_2 / ω	Γ_3 / ω	L_2 (cm)	L_3 (cm)
70	0.112	0,1,2,3	0.24×10^{-3}	0.42	0.24	0.0002
80	0.099	0,1,2	1.32×10^{-3}	–	0.06	–

Neglecting the effects of dechanneling and volume capture will lead to a rotation of the captured part of the beam by an angle [2]:

$$\beta(L_r) = \frac{L_r}{R}, \quad (10)$$

where $L_r \leq L$ is the length of the particle path in the bent crystal.

With a crystal length L , the rotation angle is determined only by that part of the trajectory when particle was staying at the bound level and it can be calculated using the following formula:

$$\beta_k = \frac{L_k}{R} [1 - e^{-\frac{L}{L_k}}]. \quad (11)$$

As an example, consider the incident beam model with uniform density along the y axis with $L_b = L_y$ and a Gaussian distribution on angle β with a width θ :

$$\frac{\theta}{\sqrt{\pi}} \Phi_0(\beta); \quad \Phi_0(\beta) = e^{-\frac{\beta^2}{\theta^2}}. \quad (12)$$

Then the angular distribution for the beam intensity at the exit from the crystal is determined by the following expression:

$$I(\beta) = I_0 \Phi(\beta); \quad I_0 = \frac{\theta}{(2k_1+1)\sqrt{\pi}} \frac{\omega}{dV'(x_0)}; \quad \Phi(\beta) = \sum_{k=0}^{k_1} (2k+1) \Phi_0(\beta - \beta_k), \quad (13)$$

The characteristic form of this function is shown in figure 2.

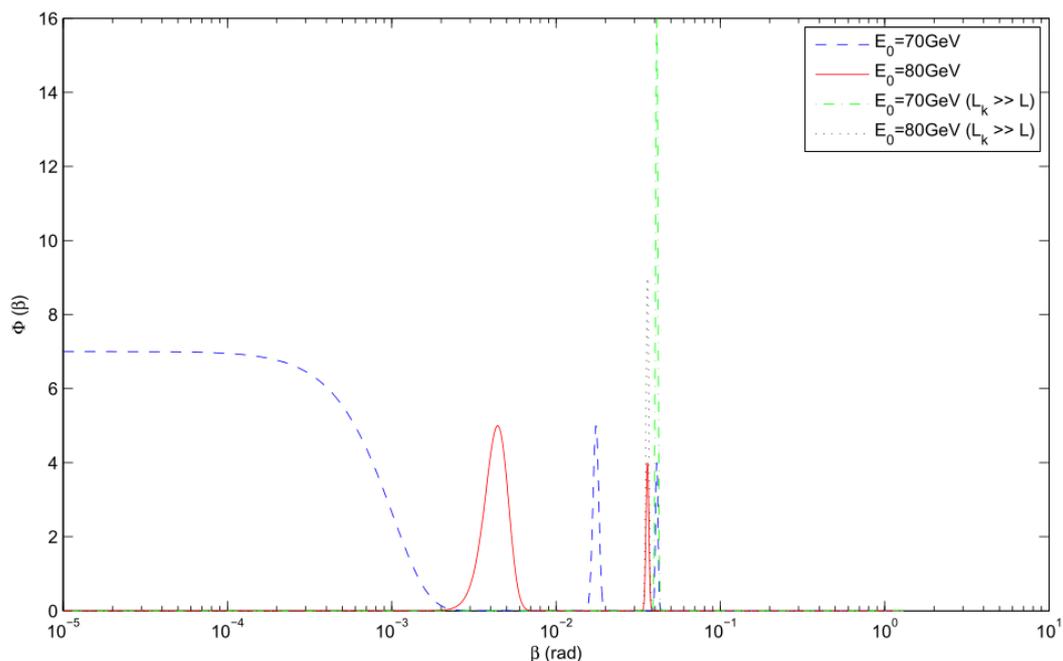


Figure 2 – Angular distribution of the particles exited from the crystal

In the result, it shown in the report that a fine structure of angular distribution in the rotated beam should appear in the framework of the quantum-mechanical effects for the particles channeled by the bent crystal. Its characteristic form depends on the number of the particle localized states in the average potential of the planes.

References

1. Feranchuk I. D., *Tehnicheskoi Z. Fiz.* 51 (1981) 270.
2. Biryukov V. M., Kotov V. I., Chesnokov Yu. A. *Uspekhi Fiz. // Nauka* 164 (1994) 1017.
3. Gemmell D. S. Channeling and related effects in the motion of charged particles through crystals // *Rev. Mod. Phys.* 46 (1974) 129.
4. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Quantum Mechanics // Nauka.* – Moscow, 1974.

В работе рассмотрено плоскостное каналирование ультрарелятивистских частиц в равномерно изогнутых монокристаллах в рамках модели потенциала Пешля–Теллера. Найдены квазистационарные уровни энергии частиц в изогнутом канале и тонкая структура распределения по углам вылета частиц из кристалла, обусловленная квантовыми эффектами.

Нгуен Куанг Шан, аспирант физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, quangsansbu@gmail.com.

Научный руководитель – *Феранчук Илья Давыдович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики и астрофизики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, feranchuk@bsu.by.

УДК 533.9.082.5;543.423;621.373.826

В. А. АКУЛИЧ, М. А. МАЛЕЦ, М. П. ПАТАПОВИЧ

ОБРАЗОВАНИЕ НАНОПОРОШКОВ Al И AlO ПРИ ОБРАБОТКЕ АЛЮМИНИЯ СЕРИЕЙ МОЩНЫХ СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Эксперименты проводились с помощью лазерного двухимпульсного атомно-эмиссионного спектрометра LSS-1. Установлено, что воздействие последовательности серий сдвоенных лазерных импульсов, сдвинутых относительно друг друга, на поверхность алюминиевой мишени обеспечивает увеличение количества ионов алюминия в лазерной плазме.

Нанопорошковые технологии являются одними из самых распространенных направлений в нанотехнологиях. Получаемые таким способом материалы находят применение в электронике, медицине,

биологии, химическом катализе и других областях науки и техники, а также используются для конструирования объемных изделий. Развитие методов синтеза наночастиц с требуемыми свойствами (нужным размером, формой, химическим составом и структурой) является очень важной практической задачей.

Замечено, что физические процессы, связанные с образованием лазерной плазмы, разлетом ее в газовое окружение и последующим осаждением продуктов на подложке настолько многофакторны, следовательно, не удается получить достаточно простых закономерностей, описывающих эти процессы.

Следует отметить, что температура лазерной плазмы определяет наличие в ней ионов, электронов, радикалов и нейтральных частиц, находящихся в возбужденном состоянии, что приводит к высоким скоростям взаимодействия и быстрому протеканию реакций. Высокая температура обеспечивает переход практически всех исходных веществ в газообразное состояние и последующую конденсацию продуктов. Анализ компонентного, в частности, зарядового и энергетического распределения состава лазерного факела возможно на основе воздействия на первичную плазму дополнительного лазерного воздействия.

В процессе лазерного газофазного осаждения можно разделить две стадии. Первая представляет собой испарение мишени под воздействием лазерного излучения, а следовательно, и создание лазерной плазмы содержащей пары металлов. Вторая является синтезом ультрадисперсного порошка из паровой фазы и активированного газа. Пары металла образуют соединения с ионизированными химическими элементами газов, составляющих плазму (нитриды, оксиды). Поэтому, чтобы получать ультрадисперсные порошки и сверхтонкие пленки, необходимо варьировать условия испарения.

Состав и размер наночастиц можно контролировать изменением давления и состава атмосферы, мощностью лазерного импульса, температурного градиента между испаряемой мишенью и поверхностью, на которую происходит конденсация.

Природа абляционных процессов зависит как от типа материала, так и от состава окружающей среды. Однако в большей степени суть процессов определяется характеристиками лазерного излучения, такими, как интенсивность, длительность импульса, длина волны, частота повторения и число импульсов.

Использование метода лазерной абляции со сдвоенными лазерными импульсами позволяет целенаправленно влиять на компонентный и зарядовый состав потока лазерной плазмы. Ряд вопросов, возникающих при создании оптимальных условий для проведения исследований поверхности металлов, можно эффективно решить с помощью лазерного многоканального атомно-эмиссионного спектрометра LSS-1. Спектрометр включает в себя в качестве источника возбуждения плазмы двухимпульсный неодимовый лазер с регулируемым временным интервалом между импульсами. Лазер может работать с частотой повторения импульсов до 10 Гц и максимальной энергией излучения каждого из сдвоенных импульсов до 80 мДж, на длине волны 1064 нм. Длительность импульсов ≈ 15 нс. Размер сфокусированного пятна примерно 50 мкм.

Параметры, определяющие оптические свойства плазмы, например, концентрация электронов, температура, размер плазменного облака, сильно изменяются в течение лазерного импульса. До сих пор не выяснено, как влияет временной интервал между сдвоенными лазерными импульсами на процессы образования соединений алюминия в газовой фазе и их влияние на эффективность пробоя образца и окружающего газа при работе со сплавами алюминия.

Нами была изучена динамика изменения атомного и ионного состава приповерхностной плазмы и образования нанокластеров AlO в приповерхностной лазерной плазме в зависимости от изменения временного интервала между ними от 0 до 110 мкс [1]. Двухимпульсное лазерное излучение фокусировали на пластинку толщиной 1 мм алюминиевого сплава Д16Т с помощью ахроматического конденсора

Динамика образования продуктов взаимодействия атомов алюминия с кислородом (AlO) изучена по наиболее интенсивной электронно-колебательной полосе радикала AlO (484,21 нм). Образование ионов алюминия изучали по линиям ионов алюминия Al II (466,3 нм) и Al III (452,92 нм).

На рис. 1 приведена зависимость интенсивности линий оксида алюминия и ионов алюминия от интервала времени между первым и вторым импульсом. Энергия первого импульса – 49 мДж, второго – 46 мДж. Задержка первого импульса – 130 мкс, задержка второго варьируется от 0 до 60 мкс. Число последовательных сдвоенных импульсов в серии – 40. Размер пятна повреждения примерно 120 мкм.

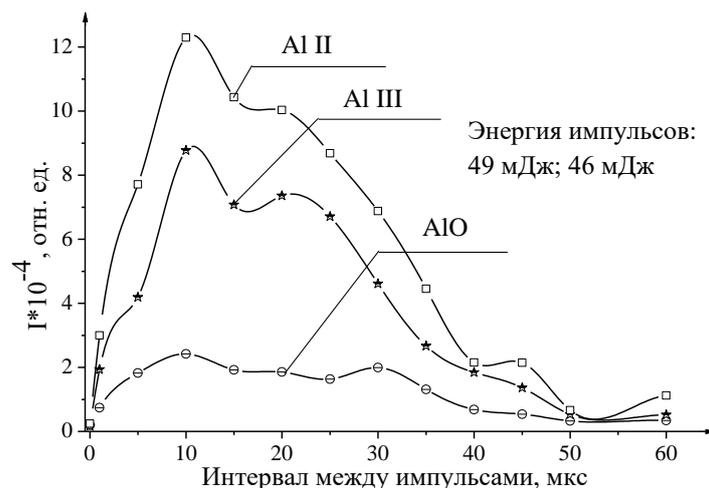


Рисунок 1 – Интенсивность линий ионов алюминия и полосы AlO в зависимости от межимпульсного интервала

Из приведенных данных видно, что наиболее существенное образование комплексов AlO и ионов алюминия наблюдается при воздействии на образец второго импульса при задержке порядка 1–40 мкс. При большей задержке интенсивность линий в плазме падает, скорость образования продуктов уменьшается примерно в 5 раз. После окончания лазерного импульса свечение ионов алюминия прекращается через 1 мкс, однако свечение ионов газовой среды продолжается до 10 мкс, атомов – до 30–40 мкс [2]. Так как время жизни возбужденных состояний молекулы AlO по отношению к излучению составляет около 100 нс, то присутствие излучения в течении нескольких микросекунд можно связать с образованием электронно-возбужденных молекул AlO.

При увеличении интервала между аблирующими импульсами низкопороговый пробой на частицах возникает все реже и, в конечном счете, исходно высокая «оптическая прочность» чистого воздуха восстанавливается, что связано с удалением или оседанием частиц [2; 3].

При проведении экспериментов было замечено, что наиболее существенное образование комплекса AlO и ионов алюминия наблюдается при воздействии на образец второго из серии сдвоенных импульсов с задержкой в интервале 10–16 мкс. Следовательно, проведем оценку изменения компонентного состава плазмы в зависимости от энергии импульсов при задержке второго импульса в 10 мкс и приведем суммарную картину зависимости интенсивности линий образующихся компонентов от энергии лазерных импульсов на рис. 2.

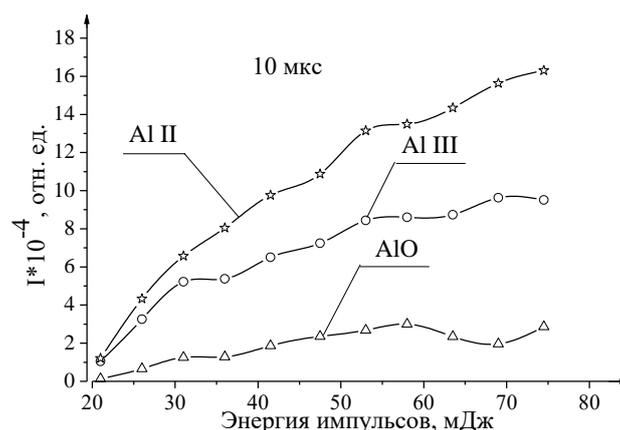


Рисунок 2 – Зависимость интенсивности линий компонентов от энергии импульса

Полученные данные показывают, что при нулевом и малом временном интервале между импульсами скорость образования продуктов очень мала. При большом времени задержки эффект воздействия второго импульса ослабляется. Следовательно, для проведения дальнейших исследований было выбрано оптимальное

время задержки в 10 мкс, 12 мкс и 16 мкс. В этом случае при различных энергиях импульса достигаются максимальные интенсивности полосы субоксида алюминия (AlO). Результат представлен на рис. 3.

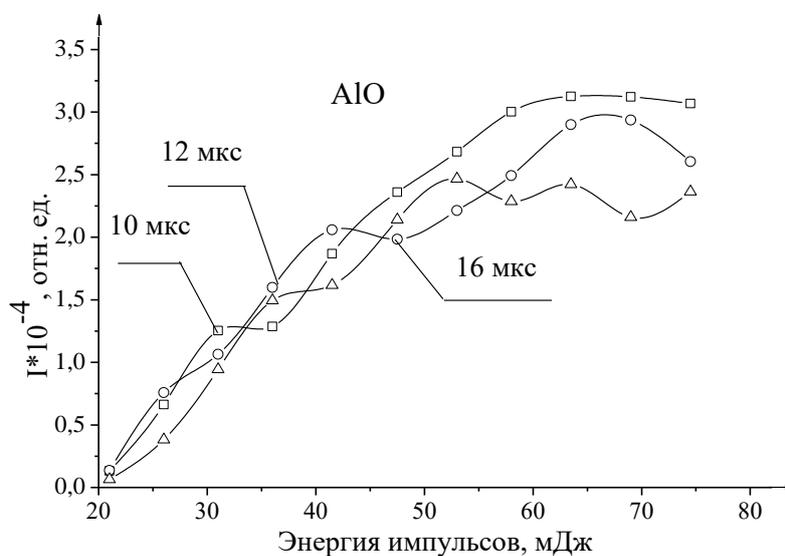


Рисунок 3 – Зависимость интенсивности полосы субоксида алюминия от энергии импульса

При увеличении энергии импульса от 20 до 60 мДж интенсивность линии линейно увеличивается в 5–7 раз. Максимальное образование AlO соответствует энергии 45–65 мДж. Дальнейшее увеличение энергии импульсов приводит к замедлению скорости роста, интенсивность полосы субоксида алюминия даже несколько уменьшается, что, по-видимому, свидетельствует об изменении процесса их образования.

Таким образом, выполненные спектроскопические исследования характеристик лазерной плазмы, образуемой при воздействии на алюминий последовательностью сдвоенных лазерных импульсов, показали возможность контроля и управления характеристиками плазмы и возможность получения необходимых концентраций Al и AlO в расширяющейся плазме.

Список литературы

1. Атомно-эмиссионный многоканальный спектральный анализ: научное и практическое применение / Е. С. Воропай [и др.] // Вестн. Бел. гос. ун-та. Сер. 1. – 2009. – № 1. – С. 14–20.
2. Laser ablation for analytical sampling: what can we learn from modeling? / A. Bogaerts [et al.] // Spectrochimica Acta, Part B: Atomic Spectroscopy. – 2003. – Vol. 58, № 11. – P. 1867–1893.
3. Laser-induced vaporization of a metal surface / M. Aden [et al.] // J. of Physics. D, Appl. Physics. – 1992. – Vol. 25, № 1. – P. 57–65.

The experiments were performed using laser double-pulse atomic emission spectrometer LSS-1. It has been found, that the effect of a series of double laser pulses on the surface of a metal target leads to the increased numbers of aluminum in the laser plasma.

Акулич Валентин Александрович, студент 2 курса уровня высшего образования факультета электросвязи Белорусской государственной академии связи, VAAKU2019@mail.ru.

Малец Мария Александровна, студентка 2 курса уровня высшего образования факультета электросвязи Белорусской государственной академии связи.

Научные руководители – *Патапович Мария Петровна*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики и физики факультета инжиниринга и технологий связи Белорусской государственной академии связи, Минск, Беларусь, mpetrat@mail.ru.

Зажогин Анатолий Павлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, zajogin_an@mail.ru.

В. А. АКУЛИЧ, А. О. ЗАХОЖИЙ, М. П. ПАТАПОВИЧ

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОДУКТОВ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЯ МОЩНЫМИ СДВОЕННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА

Эксперименты проводились с помощью лазерного двухимпульсного атомно-эмиссионного спектрометра LSS-1 (производство совместного белорусско-японского предприятия «LOTIS ТП»). Установлено, что увеличение числа импульсов в серии обеспечивает рост концентрации АЮ за счет сверхзвукового расширения турбулентного перемешивания газа, содержащего ионы алюминия.

В настоящее время в промышленности широко используются дюралюминиевые сплавы, которые обладают высокой механической прочностью, но низкой коррозионной стойкостью. Коррозионную стойкость дюралюминия повышают плакированием его чистым алюминием. Например, при формировании интегральных микросхем в приборостроении необходимо создание электроизоляционных слоев на поверхности алюминиевых подложек.

Развитие методов синтеза наночастиц с требуемыми свойствами, главными из которых являются размер, форма и химический состав, является очень важной практической задачей. Целенаправленное изменение и анализ компонентного, зарядового и энергетического распределения состава лазерного факела возможно на основе воздействия на первичную плазму дополнительного лазерного воздействия.

Широкий круг вопросов, возникающих при создании оптимальных условий для проведения исследований, можно разрешить при использовании лазерного многоканального атомно-эмиссионного спектрометра LSS-1. Данный прибор включает в себя в качестве источника возбуждения плазмы двухимпульсный неодимовый лазер с регулируемой энергией и интервалом между импульсами (модель LS2131 DM). Лазер обладает широкими возможностями как для регулировки энергии импульсов (до 80 мДж), так и временного интервала между сдвоенными лазерными импульсами (0–100 мкс) излучения. Лазер может работать с частотой повторения импульсов до 10 Гц и максимальной энергией излучения каждого из сдвоенных импульсов до 80 мДж, на длине волны 1064 нм. Длительность импульсов ≈ 15 нс. Временной сдвиг между сдвоенными импульсами может изменяться с шагом 1 мкс. Лазерное излучение фокусировалось на образец с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 100 мм. Размер пятна фокусировки примерно 50 мкм.

Для получения аэрозолей Al и продуктов, образующихся при взаимодействии ионов алюминия с кислородом и азотом воздуха, использовался закрытый стеклянный бюкс, куда помещалась мишень из алюминия. Облучение проводили сериями из 50 сдвоенных импульсов, при энергии импульсов 40 мДж в течении 3 минут. Для снимков продуктов использовался микроинтерферометр Линника МИИ-4 (увеличение в 300 раз). Внешний вид продуктов осаждения приведен на рис. 1.

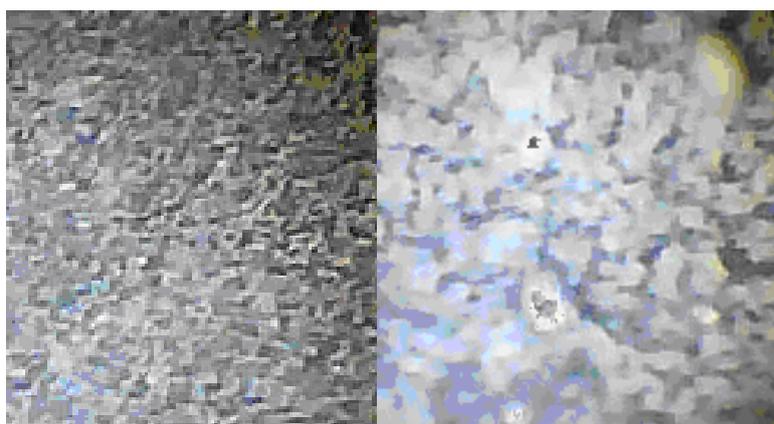


Рисунок 1 – Снимок, демонстрирующий внешний вид продуктов осаждения

Из представленного снимка видно, что продукты, осевшие на подложку, слабо взаимодействуют с поверхностью.

В дальнейшем были оценены параметры, относящиеся к лазерной абляции образцов Д16Т последовательностью сдвоенных лазерных импульсов при образовании АЮ, выяснены особенности образования плазмы в микроканале: исследованы процессы образования АЮ при воздействии серий последовательных сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевый сплав Д16Т в атмосфере воздуха [2; 3]. Динамику пробоя оценивали по поступлению компонентов мишени в плазму при воздействии серий из 120 сдвоенных лазерных импульсов на точку. Временной интервал между сдвоенными импульсами 10 мкс, энергия импульсов 30–80 мДж. Размер точки фокусировки ≈ 50 мкм при фокусном расстоянии ахроматического объектива 104 мм. Образование продуктов взаимодействия атомов алюминия с кислородом (АЮ) изучено по наиболее интенсивной электронно-колебательной полосе радикала АЮ (484,21 нм). Что касается образования ионов алюминия, то их изучали по линиям ионов алюминия Al II (466,3 нм) и Al III (452,92 нм).

На рис. 2 в качестве примера приведена зависимость интенсивности линий исследуемых компонентов плазмы от числа сдвоенных лазерных импульсов при средней энергии импульсов 49 мДж и задержкой между сдвоенными импульсами 10 мкс.

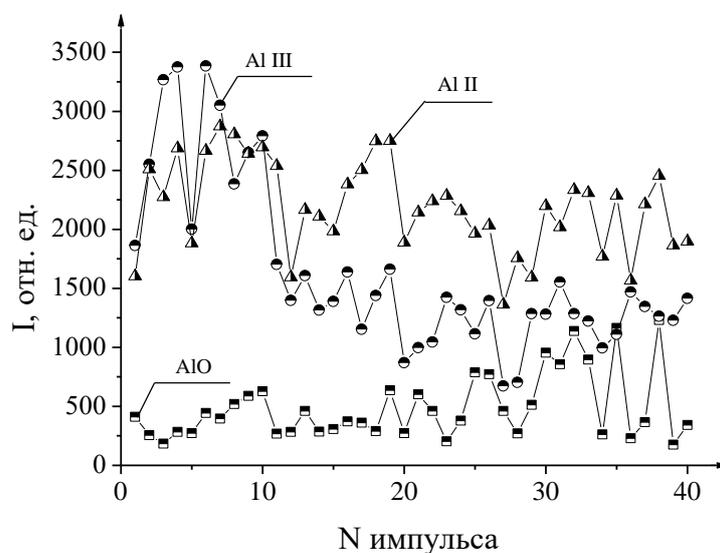


Рисунок 2 – Зависимость интенсивности полосы АЮ и линий ионов Al II, Al III в последовательных послыных спектрах

Из анализа графика видно, что скорость образования субоксида алюминия (АЮ) значительно зависит от номера импульса. Следует отметить корреляционную связь между интенсивностью линии Al III и полосы АЮ. При падении интенсивности линии алюминия Al III в 2–4 раза примерно с 10 импульса, одновременно практически во столько же раз увеличилась интенсивность полосы АЮ. Интенсивность ионной линии Al II во всем диапазоне импульсов падает только на 20–30 %. По-видимому, двукратно ионизированные ионы алюминия Al III принимают более активное участие в термохимических реакциях в воздушной среде с образованием АЮ, чем однократно ионизованные.

Наблюдаются резкие изменения интенсивности линий компонентов без корреляции между собой в спектрах испускания плазмы. Наибольшая интенсивность линий субоксида алюминия и ионов алюминия наблюдается в интервале 15–45 импульсов. При меньшем числе импульсов (от 0 до 10) образование продуктов уменьшается. Это может объясняться эффективным удалением частиц из пока еще мелкого кратера за счет конвективных потоков воздуха. При других энергиях импульсов получены аналогичные результаты.

Для более глубокого понимания скрытых механизмов воздействия сдвоенных лазерных импульсов необходимо рассмотреть процессы, происходящие как на поверхности, так и в приповерхностной плазме внутри образующегося канала. Наличие существенного влияния определенного временного интервала и числа сдвоенных импульсов на образование АЮ при абляции мишени (формирование молекулярных соединений) указывает на необходимость изучения особенностей плазмообразования внутри образующегося достаточно глубокого канала.

В воздушной среде при большом числе импульсов картина плазмообразования существенно усложняется. Это происходит не только из-за практически неизбежного формирования глубоких отверстий, но и из-за

последствия, которое вызывает накопление аблированных наночастиц и кластеров в атмосфере образующейся полости. Воздействие следующего через небольшой интервал времени импульса приводит к низкороговому оптическому пробою воздуха, насыщенного наночастицами металла, и появлению одновременно двух разнесенных в пространстве плазменных образований. Одно из них – обычный факел лазерной плазмы на аблируемой поверхности и на дне формируемого отверстия; другое – плазменно-пылевое облако, также возникающее на оси лазерного пучка. Однако оно отстоит от поверхности на значительно большем расстоянии, чем после воздействия второго импульса на продукты конденсации паров металла, образовавшихся в результате воздействия первого импульса. Это приводит, с одной стороны, к дополнительной экранировке, а с другой – к созданию высокотемпературного плазменного облака высокого давления, находящегося ближе к поверхности и разлетающегося преимущественно по направлению отверстия. При постепенном увеличении длины канала эффект этого действия уменьшается за счет постепенного сдвига области образования пылевого облака вглубь канала (область 30–40 импульсов). Это подтверждается также и значительно меньшим изменением количества ионов алюминия.

Таким образом, наличие конденсированной фазы в плазменном факеле оказывает значительное влияние на кинетические процессы, протекающие в плазме, и, следовательно, на характеристики самой плазмы.

Список литературы

1. Сухов, Л. Т. Лазерный спектральный анализ: физические принципы / Л. Т. Сухов ; отв. ред. В. Ф. Шабанов. – Новосибирск : Наука, 1990. – 139 с.
2. Материалы в приборостроении и автоматике : справ. / Ю. М. Пятин [и др.] ; под ред. Ю. М. Пятина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1982. – 528 с.
3. Чинь, Н. Х. Спектральный контроль и управление процессами образования кластеров нитридов алюминия в плазме при воздействии на алюминий сериями двояных лазерных импульсов / Н. Х. Чинь, А. Р. Фадаиян, А. П. Зажогин // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов : межвуз. сб. науч. тр. / под общ. ред. В. М. Самсонова, Н. Ю. Сдобнякова ; Твер. гос. ун-т. – Тверь, 2011. – Вып. 3. – С. 259–263.

The experiments were performed using laser double-pulse atomic emission spectrometer LSS-1 (production of a joint Belarusian-Japanese company «LOTIS-ТII»). It has been found, that an increase in the number of pulses in a series results in growth of concentration of AlO forming due to supersonic expansion and turbulent mixing of the gas containing aluminum.

Акулич Валентин Александрович, студент 2 курса уровня высшего образования факультета электросвязи Белорусской государственной академии связи, VAAKU2019@mail.ru.

Захожий Артур Олегович, студент 2 курса уровня высшего образования факультета инжиниринга и технологий связи Белорусской государственной академии связи.

Научные руководители – *Патапович Мария Петровна*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики и физики факультета инжиниринга и технологий связи Белорусской государственной академии связи, Минск, Беларусь, mpetrat@mail.ru.

Зажогин Анатолий Павлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии Белорусского государственного университета, Беларусь, Минск, zajogin_an@mail.ru.

УДК 621.762.4

М. Ф. С. Х. АЛЬ-КАМАЛИ, А. А. АЛЕКСЕЕНКО

МИШЕНИ ДЛЯ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ И ПАРАМЕТРЫ ТОНКИХ ПЛЁНОК, ПОЛУЧАЕМЫХ НА ИХ ОСНОВЕ

В настоящей работе показана возможность формирования с применением золь-гель метода мишеней состава $\text{SiO}_2:\text{CuO}$. Изучены особенности получения мишеней на основе аэросила марки А-300 и их последующего функционального применения. Приводятся данные по морфологии структуры высококремнезёмных плёнок, сформированных магнетронным распылением таких мишеней на поверхности полированных кремниевых подложек.

Одним из основных требований получения методами напыления в вакууме покрытий с оптимальной однородностью является высокая степень гомогенности гранулометрического и химического состава исходной мишени. Используя для ее создания компоненты химической чистоты не ниже марки «осч», а также аэросил (в

качестве матрицы-носителя веществ-допантов), становится возможным распределять легирующие добавки с однородностью на молекулярном уровне, сорбируя их на поверхность глобулы аэросила (пирогенного кремнезема) в виде тонкого слоя нанометровой толщины. В общем случае открываются возможности по нанесению гомогенных покрытий в виде тонких пленок на основе SiO_2 матрицы, содержащих оксиды переходных или благородных металлов заданной концентрации и фазового состава. Дальнейшая обработка таких пленок в контролируемой газовой среде (аргон или водород), позволит не только управлять адгезионными параметрами переходного слоя между подложкой и нанесенной пленкой (возможно – многослойной), но и «выращивать» в сформированном покрытии на основе оксидов металлов наночастицы этих металлов, создавая локальные плазмонные структуры заданной геометрической формы и дисперсии размеров.

Золь-гель методом на основе водной дисперсии аэросила марки А-300, содержащей нитрат меди заданной концентрации, были получены объемные ксерогели, последовательно отожженные на воздухе при $T = 800\text{ }^\circ\text{C}$ и переведенные далее в состояние размолотых микропорошков. Методом одноосного прессования с использованием органического связующего в виде поливинилового спирта на основе этих микропорошков были сформированы мишени для магнетронного распыления диаметром порядка 80 мм и толщиной до 5 мм. Исследования морфологии структуры покрытий, полученных на основе синтезированных мишеней проводилось совместно с сотрудниками НТЦ «Белмикроданализ» филиала «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл».

На рисунке 1 приводится РЭМ-изображение поверхности покрытия состава $\text{SiO}_2\text{:CuO}$, нанесенного на полированную кремниевую подложку. Наблюдается некоторая «зернистость» поверхности покрытия, что характерно для распыления пористых мишеней, состоящих из агломератов или доменных структур.

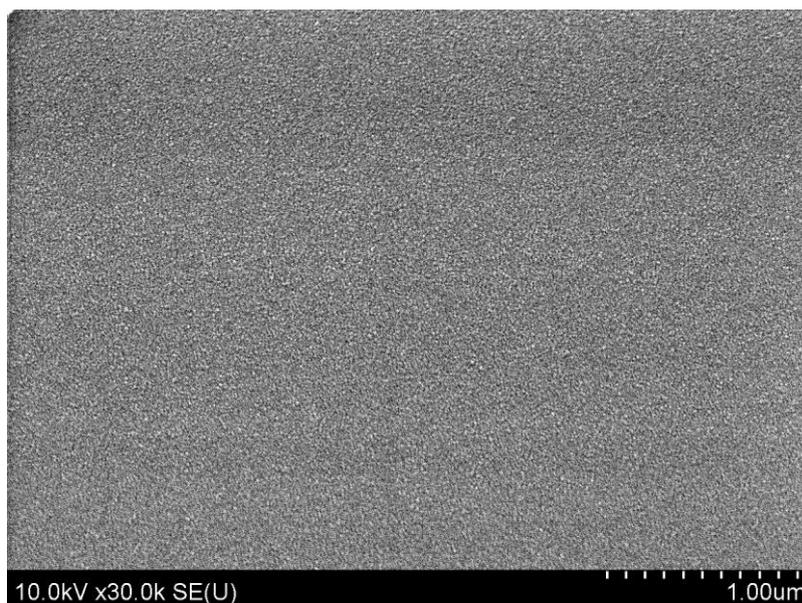


Рисунок 1 – РЭМ-изображение поверхности тонкой плёнки, сформированной на основе мишени состава $\text{SiO}_2\text{:CuO}$ на подложке из полированного кремния методом магнетронного распыления

Элементный анализ нанесенного покрытия, проведенный методом EDX (EDS) показал, что пленка состоит из: O (36,99 ат. %); Si (34,49 ат. %); Cu (3,03 ат. %) и C (25,49 ат. %). Высокое присутствие углерода связано, вероятно, с тем фактом, что при термообработке мишени на воздухе при $T = 800\text{ }^\circ\text{C}$ (1 ч) не происходит полного выгорания органического связующего. С другой стороны, отжиг мишеней при температурах, выше $800\text{ }^\circ\text{C}$, может привести к термодеструкции оксида меди CuO до одновалентного оксида Cu_2O (например, при температурах порядка $1100\text{ }^\circ\text{C}$). Также при высоких температурах возможно протекание термически стимулированных реакций взаимодействия мишени с подложкой, на которой происходит ее отжиг.

На рисунке 2 приводится РЭМ-изображение скола сформированного покрытия. Видно образование промежуточного слоя, который образовался, вероятно, при травлении (очистке) поверхности подложки атомарным кислородом и может обуславливать достаточно высокое адгезионное взаимодействие наносимого покрытия с подложкой из кремния.

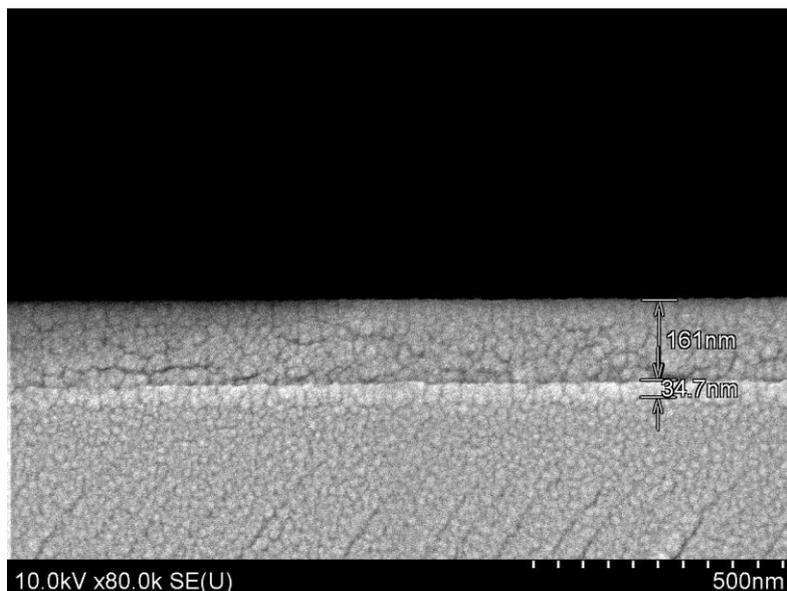


Рисунок 2 – РЭМ-изображение поверхности скола тонкой пленки, сформированной на основе мишени состава $\text{SiO}_2\text{:CuO}$ на подложке из полированного кремния методом магнетронного распыления

В общем случае получение и изучение функциональных характеристик композиционных мишеней состава диэлектрик-полупроводник, сформированных с применением методов коллоидной химии на основе оксидов кремния (или алюминия), допированных оксокомплексами переходных или благородных металлов, может представлять интерес при получении контактных площадок и пассивирующих покрытий при получении элементов интегральных микросхем. Можно наблюдать (рисунки 1, 2), что покрытия получают в этом случае с достаточно хорошей однородностью и плотной упаковкой внутренней структуры.

Таким образом, в результате проведенных исследований, были отработаны физико-технические принципы синтеза исходных материалов, предназначенных для формирования мишеней, получаемых, в итоге, на основе однородных SiO_2 -глобул узкой дисперсии размеров (предположительно покрытых оболочкой оксида металла нанометровой толщины – как результат высокой сорбционной способности частиц аэросила), а также изучены режимы формовки мишеней методом одноосного прессования на основе шихты разработанного состава.

This paper shows the possibility of forming $\text{SiO}_2\text{:CuO}$ targets using the sol-gel method. The features of obtaining targets based on A-300 aerosil and their subsequent functional application are studied. Data on the morphology of the structure of high-silica films formed by magnetron sputtering of such targets on the surface of polished silicon substrates are presented.

Аль-Камали Марван Фархан Саиф Хассан, аспирант кафедры «Материаловедение в машиностроении» Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого, Гомель, Беларусь, marwan.ye2@gmail.com.

Научный руководитель – *Алексеев Александр Анатольевич*, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник НИЧ, заведующий (научный руководитель) НИЛ «Техническая керамика и наноматериалы» Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого, Гомель, Беларусь, alexeeenko@gstu.by.

УДК 537.621.5:537.9

А. И. АЛЬХИМЕНОК, И. И. АЗАРКО, О. В. ИГНАТЕНКО, С. Ф. ПАРШУТИЧ

СИНТЕЗ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА В СИСТЕМЕ BN-Al ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУР

Кубический нитрид бора используется в металлообрабатывающей промышленности, обладает свойствами, схожими с алмазом. В работе кубический нитрид бора синтезировался каталитическим способом с использованием Al. С помощью электронного парамагнитного резонанса удалось подтвердить формирование BN_k с использованием в качестве исходной смеси системы $\text{BN}_r\text{-Al}$.

Отдельное место в области изучения синтеза при высоких давлениях занимает кубический нитрид бора (BN_k), широко используемый в инструментальной промышленности. Кубический нитрид бора имеет свойства, схожие с алмазом (износостойкость), уступая ему незначительно в твердости, но в то же время и по некоторым свойствам превосходит его. К достоинствам BN_k можно отнести высокую теплопроводность, радиационную стойкость и химическую инертность, что позволяет использовать его в микроэлектронике.

Кубический нитрид бора можно получить прямым фазовым переходом гексагонального нитрида бора в кубический $\text{BN}_r \rightarrow \text{BN}_k$ при давлениях 6–10 ГПа и температурах 1970–2270 К. Также есть возможность получить кубический нитрид бора каталитическим процессом с помощью различных металлов, которые позволяют изменить параметры прямого фазового перехода.

На сегодняшний день интерес вызывают катализаторы, использующиеся также и в качестве элемента связи. Одно из таких веществ – алюминий.

На сегодняшний день изучаются процессы взаимодействия BN с Al . В одной из работ японских ученых [1] кубический нитрид бора был синтезирован с применением в качестве растворителя сплав Ni_3Al , процесс происходил под воздействием высокого давления и высокой температуры. С применением Ni_3Al удалось установить, что диапазон образования BN_k составляет от 4,5 до 6,5 ГПа. Происходящие реакции можно разделить на два температурных диапазона: до 1400 °С и после 1400 °С. В области температур до 1400 °С BN_k образуется в результате реакции между AlN и BN , а в области после 1400 °С BN_k формировался при 6 ГПа и расплавленный Ni_3Al проник в исходный гексагональный BN с быстрой кристаллизацией BN_k .

В более ранней работе [2] для синтеза кубического нитрида бора использовали в качестве растворителя $\text{Ca}_3\text{V}_2\text{N}_4$. В этом случае удалось доказать, что формирование BN_k наблюдалось даже при 3,6 ГПа

Также проводилась работа с использованием в качестве растворителя Ni [3]. Границу реакции между нитридом бора и металлическим никелем изучали при высоких давлениях 4,5–6 ГПа в области высоких температур 1300–1900 °С. Авторы показали, что Ni растворяет BN с последующим осаждением кристаллов. А также полное превращение гексагонального BN в кубический BN_k имело место при температуре выше 6 ГПа и 1700 °С, в то время как BN_k начинал кристаллизоваться с 5,5 ГПа и 1500 °С. На границе реакции была замечена самопроизвольная рекристаллизация гексагонального BN , который демонстрировал кристаллические грани и собственные оптические характеристики в отличие от BN_k проявляющего неправильную форму.

Так же ученые из Японии в своей работе [4] получили BN_k с использованием в качестве растворителя системы $\text{Co}-(\text{Cr}, \text{Mo})-\text{Al}$ и $\text{Co}-(\text{Cr}, \text{V})-\text{Al}$. Для контроля размера зерен кристаллов BN_k в качестве заместителя Cr в базовом сплаве использовали Mo или V . Выявили, что BN_k с помощью таких систем был получен при давлениях выше 4,4 ГПа и температурах выше 1290 °С. Размер зерен кубического BN , синтезированных с использованием растворителя $\text{Co}-(\text{Cr}, \text{V})-\text{Al}$, был относительно более мелким по сравнению с зернами, синтезированными с растворителем из сплава $\text{Co}-\text{Cr}-(\text{Mo})-\text{Al}$. В системе растворителей из сплава $\text{Co}-(\text{Cr}, \text{V})-\text{Al}$, где существуют как Cr , так и V , было показано, что размер зерна синтезированного кубического BN можно контролировать, изменяя состав Cr и V в растворителе. Замена Mo на Cr была очень эффективна для получения кристаллов BN_k размером до 400–500 мкм, а замена Cr на V привела к получению кристаллов BN_k с более мелким зерном, примерно 10 мкм.

Также встречаются данные об использовании в качестве растворителей сплавов $\text{Fe}-\text{Mo}-\text{Al}$ и $\text{Co}-\text{Mo}-\text{Al}$ [5]. Использовались составы с содержанием в % масс. $\text{Fe}60,14-\text{Mo}36,86-\text{Al}3$ и $\text{Co}57,6-\text{Mo}38,4-\text{Al}4$. В этом случае BN_k синтезируется при минимальном давлении около 4,4 ГПа и температуре около 1250 °С. Давление и температура синтеза кубического BN резко снижались за счет небольшого количества Al , добавляемого в растворители из сплава $\text{Fe}-\text{Mo}$ или $\text{Co}-\text{Mo}$. Рост кубического BN начинался на границе раздела между расплавленным сплавом и источником гексагонального BN . В этой работе авторы предполагают, что $\text{Fe}-\text{Mo}$ и $\text{Co}-\text{Mo}$ работают в качестве растворителя атомов B и N , а Al действует как агент зародышеобразования кубического BN .

Исходя из этого, целью данной работы является синтезировать образцы из алюминия и нитрида бора при воздействии высоких давлений и температур, так же исследовать их с помощью электронного парамагнитного резонанса (ЭПР).

Получение образцов

Для получения образцов использовался аппарат высокого давления типа «наковальня с лункой». Аппарат состоит из двух матриц с углублениями на рабочих торцах, в которых установлен контейнер с обрабатываемым образцом. Давление в реакционной зоне создается в результате сжатия контейнера и герметизации его за счет сил трения, как в материале контейнера, так и на поверхности контакта его с матрицами [6].

Образцы спекались при давлении 2, 3, 4 и 5 ГПа и температуре 500, 1000, 1500, 2000, 2500 °С.

Исследования

Обнаружено, что для большинства образцов, синтезированных в системе $\text{BN}-\text{Al}$ с изменяющимся содержанием алюминия на спектрах ЭПР при комнатной температуре измерения, регистрируется одиночный сигнал $g = 2,0023 \pm 0,0005$ с формой линии, хорошо аппроксимируемой в центре уравнением Лоренца и удовлетворительно уравнением Гаусса по краям, а также сверхширокие линии, ответственные за ферромагнитные включения. Ширина линии одиночного сигнала изменяется в пределах от 1,5 Гс и 12,0 Гс, как

и для микропорошков BN_k , выращенных в системе с избытком азота [7]. Концентрация парамагнитных центров (ПЦ), ответственных за этот сигнал, изменяется как от содержания алюминия в образцах, так и от условий синтеза материалов. Сигнал ЭПР не насыщается при повышении мощности сверхвысоких частот (СВЧ) излучения вплоть до 150 мВт для исследованных образцов. При снижении температуры измерения до 77 К интенсивность сигнала увеличивается примерно на порядок при сохранении ширины и формы линии, а также значения g -фактора.

В образцах, полученных при изменении процентного содержания алюминия, наблюдается изменение концентрации ПЦ с $g = 2,0023$. С ростом температуры синтеза при давлении 5 ГПа наблюдается спад концентрации ПЦ для образцов, сформированных в смеси с большим содержанием алюминия. При этом с ростом температуры синтеза уменьшается количество дефектов, ответственных за сигнал с $g = 2,0023$, для полученных материалов при различном содержании алюминия в смеси. Природа относительно небольшого количества парамагнитных дефектов, ответственных за данный сигнал ($N = 10^{15}$ – 10^{16} спин/г) связывается с неспаренными электронами на вакансиях азота, причем последние могут формировать устойчивые комплексы с ионами собственных либо примесных атомов [8]. Избыток алюминия создает предпосылки для образования азотных дефектов вакансионного типа в синтезируемых материалах. Отсутствие включений аморфного бора, которые порождают сигнал с величиной g -фактора близкой к 2,005 и шириной линии больше 12 Гс, согласуется с данными, полученными в работах [9; 10] для аморфного бора.

Ширина линии сигнала с $g = 2,0023$ в композитах зависит как от температуры, так и от давления синтеза, при этом увеличение содержания алюминия в составе приводит к существенному уширению линии до 12 Гс. Уширение резонансной линии с $g = 2,0023$ можно объяснить присутствием в матрицах, синтезированных при большом количестве алюминия, локальных напряжений, вызванных протяженными структурными дефектами и колебаниями решетки. В работе [7] было показано, что концентрация точечных дефектов, ответственных за сигнал с $g = 2,0030$, меняется в образцах кубического нитрида бора от времени синтеза: в начальные моменты синтеза при меньшей температуре растут менее дефектные кристаллы, затем формируются кристаллы с вакансионными дефектами, концентрация которых превышает равновесное значение.

В виду слабой интенсивности сверхшироких линий зависимости их ширины линии носят качественный характер; можно только говорить о тенденции к увеличению ширины линии от 750 Гс до 1000 Гс для образцов синтезированных при небольшом количестве алюминия в составе, $P = 5$ ГПа при росте температуры синтеза от 500 до 2500 °С. Изменения интенсивности сигналов, ответственных за ферромагнитные включения имеют немонотонный характер и при увеличении содержания алюминия в шихте, уменьшается интенсивность сверхшироких линий.

Вывод.

1. Исследование образцов с помощью электронного парамагнитного резонанса выявило наличие в образцах BN_k .
2. Ширина линии одиночного сигнала изменяется в пределах от 1,5 Гс и 12,0 Гс как и для микропорошков BN_k , выращенных в системе с избытком азота.
3. С ростом температуры синтеза при давлении 5 ГПа наблюдается спад концентрации ПЦ для образцов BN_k , сформированных в смеси с большим содержанием алюминия, что создает предпосылки для образования азотных дефектов вакансионного типа в синтезируемых материалах.

Список литературы

1. Kubota Y., Kosuda K., Taniguchi T. Effect of Al on the Formation of Cubic Boron Nitride Using Ni_3Al Solvent under High Pressure // Japanese Journal of Applied Physics. – 2007. – Vol. 46, No. 11. – P. 7388–7391.
2. Fukunaga O., Nakano S., Taniguchi T. Nucleation and growth of cubic boron nitride using a Ca–B–N solvent // Diamond & Related Materials, 13 (2004) 1709–1713.
3. Kubota Y., Watanabe K., Taniguchi T. Synthesis of Cubic and Hexagonal Boron Nitrides by Using Ni Solvent under High Pressure // Japanese Journal of Applied Physics, 46(1):311–314, January 2007.
4. Eko A., Fukunaga O., Ohtake N. Synthesis and grain size control of cubic BN using Co–Cr–Al base alloy solvents under high pressure // Diamond & Related Materials, 40 (2013) 1–6.
5. Fukunaga O., Takeuchi S., Taniguchi T. High-pressure synthesis of cubic BN using Fe–Mo–Al and Co–Mo–Al alloy solvents // Diamond & Related Materials, 20 (2011) 752–755.
6. Мазуренко, А. М. Устройство для физико-химических исследований при высоких давлениях и температурах / А. М. Мазуренко. – М. : Наука, 1978. – С. 144–147.
7. Парамагнитные дефекты кубического нитрида бора, синтезированного в технике высокого давления / И. И. Азарко [и др.] // Вестн. БГУ. Сер., Физика, математика. – 1999. – № 2. – С. 18–23.
8. ЭПР включений в кристаллах кубического нитрида бора / А. Н. Соколов // Сверхтвердые материалы. – 1981. – № 1. – С. 15–17.
9. Linch C. H., Brown I. M., Feldman B. J. Solid State Communications. 1995, V. 96, № 6, P. 421.
10. Рудь, А. Е. Влияние внешних воздействий на парамагнитные дефекты структуры и физические свойства сфалеритного нитрида бора : дис. ... канд. физ.-мат. наук / А. Е. Рудь. – Минск, 1991. – 180 л.

Cubic boron nitride is used in the metalworking industry and has properties similar to diamond. In the work, cubic boron nitride was synthesized by a catalytic method using Al. Using electron paramagnetic resonance, it was possible to confirm the formation of cBN using the hBN-Al system as the initial mixture.

Альхименок Андрей Иванович, аспирант, младший научный сотрудник Научно-практического центра НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь, Alkhimenak@physics.by.

Азарко Игорь Иосифович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, Azarko@bsu.by.

Научные руководители – *Игнатенко Олег Владимирович*, кандидат физико-математических наук, заместитель генерального директора Научно-практического центра НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь, Ignatenko@physics.by.

Паришутич Сергей Фёдорович, научный сотрудник Научно-практического центра НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь, Serega-parashut@mail.ru.

УДК 543.42:666.752

И. А. АНУШКЕВИЧ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ ЛАЗЕРНО-ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ЕЁ ФОРМИРОВАНИИ СДВОЕННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

В исследовании установлено влияние межимпульсного интервала на интенсивность спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы, сформированной на поверхности алюминиевого сплава сдвоенными лазерными импульсами, ее температуру и концентрацию электронов в ней. Показано, что они принимают максимальные значения при задержках второго лазерного импульса относительно первого, находящихся в диапазоне 1–20 мкс.

Определение элементного и химического состава вещества является одними из важнейших составляющих современных технологий и различных отраслей промышленности. Для определения количественного состава вещества используются различные физические методы, среди которых, наиболее перспективными являются спектральные. Основными их достоинствами являются экспрессность, низкие пределы обнаружения, возможность определения ряда элементов в одной пробе. Применение лазерного воздействия на вещество придало новый импульс развитию спектральных методов анализа [1; 2].

На первом этапе развития лазерно-эмиссионного спектрального анализа испарение вещества осуществлялось одиночными лазерными импульсами. Однако стабильность спектроскопических характеристик лазерной плазмы была низкой, предел обнаружения химических элементов был не высоким. В моноимпульсном режиме стабильность спектроскопических характеристик лазерной плазмы удалось улучшить путем подбора параметров лазерного импульса, таких как длина волны, длительность импульса, частота повторения, энергия импульса, количество накопленных импульсов, окружающая исследуемый объект среда, фокусировка лазерного излучения и т. д. [3; 4].

Возможности лазерно-эмиссионного спектрального анализа существенно расширились с использованием двухимпульсного возбуждения, при котором наблюдается резкое увеличение интенсивности спектральных линий химических элементов. Авторами работ [5; 6] выполнены спектроскопические исследования плазмы, образующейся на поверхности алюминиевого образца при воздействии на него двух последовательных импульсов лазерного излучения. Показано увеличение доли ионов в лазерно-индуцированной плазме при двухимпульсном режиме возбуждения.

Для практического применения устройств использующих разрядную или лазерно-эмиссионную плазму необходимы исследования свойств излучающей плазмы, которая является в них рабочим телом. Знание физических процессов, протекающих в плазме, позволяет сформулировать требования к ее формированию. При выполнении этих требований реализуются наиболее благоприятные условия для эмиссии светового излучения и получения максимальной эффективности преобразования подводимой энергии в световой поток. Исследование излучений плазмы в широком спектральном диапазоне, зондирование плазмы внешними источниками излучения позволяют исследовать процессы, происходящие в ней, измерять температуру без введения в плазму зондов. Исследования интенсивностей спектральных линий, молекулярных полос и непрерывного спектра позволяют получить информацию о температуре и плотности электронов в плазме, а также температуре газов, заполняющих разрядный объем этих источников излучения [7; 8].

Целью настоящей работы является определение температуры лазерно-эмиссионной плазмы и концентрации электронов в ней спектральными методами.

Для достижения поставленной цели использовалась методика, описанная в [9; 10]. Температуру плазмы определяем, измеряя отношения интегральных интенсивностей двух спектральных линий, принадлежащих одному и тому же излучающему химическому элементу (алюминию). Расчеты проводились по формуле (1)

$$T_e = \frac{E_l - E_k}{k \cdot \ln \left[\left(\frac{J_{ki}}{J_{lm}} \right) \cdot \left(\frac{A_{lm}}{A_{ki}} \right) \cdot \left(\frac{g_l}{g_k} \right) \cdot \left(\frac{\lambda_{ki}}{\lambda_{lm}} \right) \right]} \quad (1)$$

где J_{lm} и J_{ki} – интенсивности излучения, A_{lm} и A_{ki} – вероятности спонтанных переходов, g_l и g_k – статистические веса возбужденных состояний, λ_{ki} и λ_{lm} – длины волн спектральных линий, E_l и E_k – энергия возбужденного состояния, отсчитываемая от основного уровня, k – постоянная Больцмана.

Для определения температуры лазерно-эмиссионной плазмы как следует и формулы (1) необходимо определить относительную интенсивность двух спектральных линий. Экспериментальные исследования проводились на модернизированной установке, описанной в [11; 12]. Излучение лазера фокусировалось на исследуемый образец, и на нем формировался лазерно-эмиссионный плазменный факел, излучение которого с помощью оптико-механического блока фокусировки и сбора излучения направлялось в монохроматор – спектрограф MS 2004i. Регистрация эмиссионного спектра лазерной плазмы на выходе монохроматора-спектрографа осуществлялась с помощью регистратора оптического излучения UC-16H10420-1106 на базе ПЗС-линеек. Производилась серия воздействий на исследуемый образец лазерными импульсами YAG:Nd³⁺-лазера (1,06 мкм) лазерные импульсы производились с задержкой начиная с 0 мкс до 300 мкс. Полученные спектры лазерно-эмиссионной плазмы накапливались, усреднялись и отображались в виде спектра в программе Qsp Client.

На рисунке 1 представлены экспериментальные зависимости интенсивности спектральных линий Al I 308,215 нм и Al I 309,271 нм (в относительных единицах) лазерно-эмиссионной плазмы алюминиевого сплава от межимпульсного интервала (в микросекундах) (задержки второго лазерного импульса относительно первого). Суммарная энергия лазерных импульсов составляла 39,5 мДж. Анализ представленных на рисунке 1 кривых позволяет выявить ряд закономерностей и особенностей в их поведении. Так, для обеих спектральных линий максимальная их интенсивность наблюдалась при межимпульсном интервале до 10 мкс. При межимпульсном интервале ~50 мкс наблюдается минимум интенсивности этих линий. В дальнейшем наблюдается слабо выраженный рост их интенсивности, достигающий максимума при межимпульсном интервале ~150 мкс.

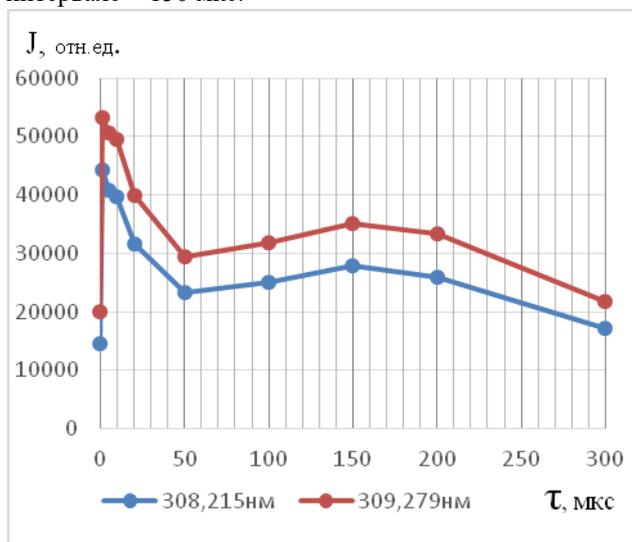


Рисунок 1 – Зависимости интенсивности линий алюминия от временного интервала между лазерными импульсами

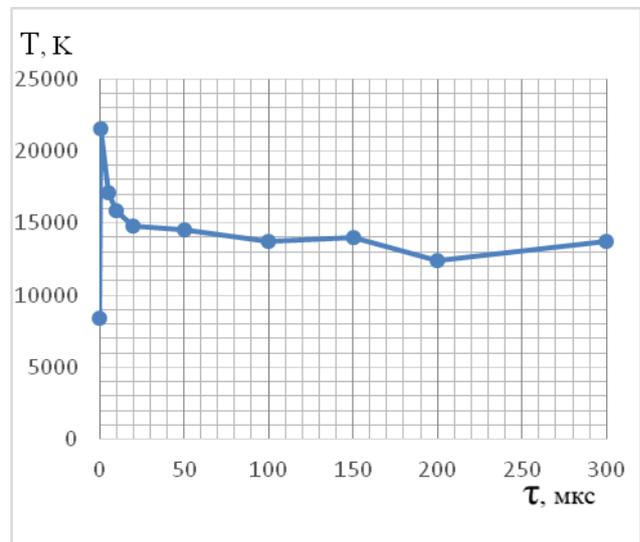


Рисунок 2 – Зависимость температуры лазерно-эмиссионной плазмы алюминия от временного интервала между лазерными импульсами

Взятые из рисунка 1 значения интенсивностей спектральных линий подставлялись в формулу (1). Таким образом был произведен расчет температуры лазерно-эмиссионной плазмы в зависимости от задержки второго лазерного импульса относительно первого в диапазоне 0–300 мкс. Вероятности спонтанных переходов и статистические веса возбужденного и основного состояния брались из справочника [13]. По полученным данным была построена зависимость температуры лазерно-эмиссионной плазмы от задержки второго лазерного импульса относительно первого которая представлена на рисунке 2. Из рисунка 2 видно, что температура

лазерно-эмиссионной плазмы сильно зависит от задержки второго лазерного импульса относительно первого в течение первых 30 мкс. В диапазоне задержек 30–300 мкс температура плазмы почти не изменялась. Очевидно, что для полного выявления закономерностей требуется дальнейшее исследование в данной области.

Концентрация электронов была определена по формуле (2) из [9; 10].

$$n_e = \frac{\alpha \cdot n_a}{1 - \alpha}, \quad (2)$$

где α – степень ионизации плазмы, определяемая по формуле (3) из [9; 10]

$$\alpha = 2,2 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{g_2}{g_1}} \cdot \frac{T^{5/4}}{\sqrt{p}} \cdot e^{-\frac{5800U_i}{T}} \quad (3)$$

где g_1, g_2 – статистические веса ионов и тяжелых частиц; h – постоянная Планка; p – парциальное давление (находится из уравнения Менделеева – Клапейрона), U_i – потенциал ионизации, m_e – масса электрона, α – степень ионизации, T – температура плазмы.

Концентрацию атомов в плазме примем равной $n_a = 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Взятые из рисунка 2 значения температур подставлялись в формулу (3) и по формуле (2) вычислялись концентрации электронов в лазерно-эмиссионной плазме. По полученным данным была построена зависимость концентрации электронов в лазерно-эмиссионной плазме от задержки второго лазерного импульса относительно первого, которая представлена на рисунке 3. Из рисунка 3 видно, что концентрация электронов в лазерно-эмиссионной плазме сильно зависит от задержки второго лазерного импульса относительно первого в течение первых 20 мкс. В диапазоне задержек 20–300 мкс температура плазмы почти не изменялась.

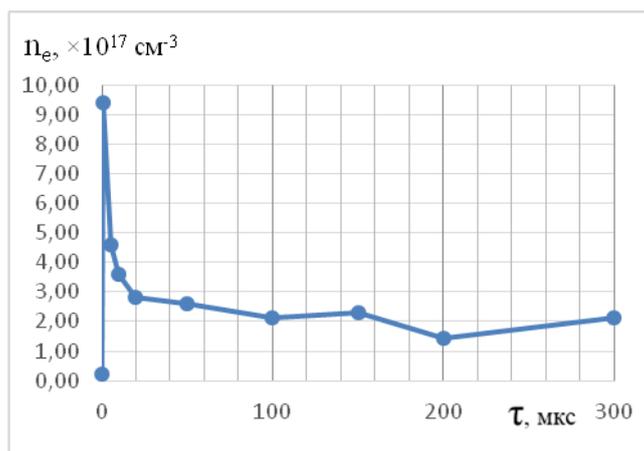


Рисунок 3 – Зависимость концентрации электронов в лазерно-эмиссионной плазме от временного интервала между лазерными импульсами

Таким образом, из проведенных исследований следует, что интенсивность спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы, ее температура и концентрация электронов в ней принимают максимальные значения при задержках второго лазерного импульса относительно первого находящихся в диапазоне 1–20 мкс. Это обусловлено тем, при малых задержках второго лазерного импульса относительно первого происходит взаимодействие плазменных факелов, образованных последовательно идущими лазерными импульсами, происходит дополнительное возбуждение плазмы, сформированной первым лазерным импульсом, вторым плазменным факелом изнутри. При больших межимпульсных интервалах мы регистрируем свечение двух практически независимых плазменных факелов, следующих один за другим.

Список литературы

1. Скворцов, Л. А. Лазерные методы дистанционного обнаружения химических соединений на поверхности тел / Л. А. Скворцов. – М. : Техносфера, 2015. – С. 208.
2. Кремерс, Д. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия / Д. Кремерс, Л. Радиемски. – М. : Техносфера, 2009. – 370 с.

3. Ануфрик, С. С. Исследование химического состава глазурей керамических плиток / С. С. Ануфрик, Н. Н. Курьян, И. И. Жукова, К. Ф. Зноско, М. В. Бельков // Журнал прикладной спектроскопии. – 2016. – Т. 83, № 5. – С. 724–730.
4. Ануфрик, С. С. Модификация химического состава и повышение износостойкости полуфриттовой глазури напольной керамической плитки путем добавления плавящего корунда / С. С. Ануфрик, Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, И. И. Жукова // Журнал Бел. гос. ун-та. Физика. – 2017. – № 2. – С. 83–94.
5. Ануфрик, С. С. Влияние плотности мощности лазерного излучения на интенсивность спектральных линий основных компонентов лазерной плазмы глины / С. С. Ануфрик, Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, М. В. Бельков // Журнал прикладной спектроскопии. – 2018. – Т. 85, № 2. – С. 285–292.
6. Воропай, Е. С. Зависимость интенсивности спектральных линий углерода от структуры железных сплавов при двухимпульсной лазерной абляции / Е. С. Воропай, К. Ф. Ермалицкая // Вестник БГУ. – 2011. – № 2. – С. 10–13.
7. Зноско, К. Ф. Распределение интенсивности излучения плазмы импульсно-периодического разряда в смеси паров ртути с аргонном / К. Ф. Зноско, В. Ч. Белаш // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2019. – Т. 9, № 1. – С. 78–89.
8. Зноско, К. Ф. ХеСІ-эксилампы ёмкостного разряда / К. Ф. Зноско // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2018. – Т. 8, № 3. – С. 102–112.
9. Белаш, В. Ч. Температура и концентрация электронов импульсного разряда в смеси паров ртути с аргонном / В. Ч. Белаш, К. Ф. Зноско // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2018. – Т. 8, № 3. – С. 83–92.
10. Зноско, К. Ф. Определение концентрации возбужденных атомов гелия в разрядной плазме низкого давления при высокочастотном возбуждении / К. Ф. Зноско, В. Ч. Белаш // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2019. – Т. 9, № 2. – С. 114–125.
11. Курьян, Н. Н. Временная динамика свечения лазерно-эмиссионного факела глины / Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, В. В. Григуть // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2018. – Т. 8, № 2. – С. 101–110.
12. Ануфрик, С. С. Влияние плотности мощности лазерного излучения на интенсивность спектральных линий основных компонентов лазерной плазмы глины / С. С. Ануфрик, Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, М. В. Бельков // Журнал прикладной спектроскопии. – 2018. – Т. 85, № 2. – С. 285–292.
13. Радциг, А. А. Параметры атомов и атомных ионов : справ. / А. А. Радциг, Б. М. Смирнов. – 2-е изд. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 382 с.

In the present work, the influence of the interpulse interval on the intensity of the spectral lines of a laser-emission plasma formed on the surface of an aluminum alloy by double laser pulses, its temperature, and the electron concentration in it is established. It is shown that they take maximum values when the delays of the second laser pulse relative to the first are in the range of 1–20 μ s.

Анушкевич Ілья Александровіч, магістрант 1 курса фізико-тэхнічнага факультэта Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы, Гродно, Беларусь, anushkevich.1997@mail.ru.

Научный руководитель – *Зноско Казимир Францевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы, Гродно, Беларусь, znosko@grsu.by.

УДК 533.9.082.5;621.373.826;621.793.79

БАЗЗАЛ ХОДОР, М. Н. КОВАЛЕНКО

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОПОРОШКОВ Al и AlO ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА АЛЮМИНИЙ МОЩНЫМИ СДВОЕННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА

Изучено влияние дополнительного лазерного импульса на целенаправленное формирование компонентного и зарядового состава лазерной плазмы методом лазерной искровой спектрометрии (спектрометр LSS-1). Показана возможность увеличения доли радикалов AlO в лазерном факеле при последовательном воздействии серии сдвоенных импульсов на алюминиевую мишень. Методами КР показана возможность получения оксидов алюминия и продуктов взаимодействия кислорода и азота воздуха в лазерной плазме, осаждаемых на стеклянную поверхность.

Нанопорошковые технологии являются одними из самых распространенных направлений в нанотехнологиях. Получаемые с их помощью НП, находят применение в электронике, медицине, биологии, химическом катализе и других областях науки и техники, а также используются для конструирования объемных изделий. Поэтому развитие методов синтеза наночастиц с требуемыми свойствами, главными из которых являются размер, форма, химический состав, структура и степень агломерации НЧ, является очень важной практической задачей [1].

Основная проблема технологии наноматериалов – сохранение у элементов структуры химического состава и размеров, позволяющих относить их к наноструктуре. При взаимодействии с окружающей средой могут

наблюдаться нежелательные химические превращения, агрегация и рост элементов структуры за пределы наноразмеров, приводящие к потере их уникальных свойств.

Лазерная абляция твердых тел наносекундными импульсами умеренной интенсивности используется во многих научных и практических приложениях. При использовании схем и методов двухимпульсного лазерного воздействия при различных углах падения на мишень и плазму возможно одновременное проведение высокочувствительного спектрального анализа [2], контроля концентрации возбужденных и заряженных частиц плазмы и управлением составом плазмы, направляемой на подложку.

Цель работы состояла в том, чтобы показать возможность и определить условия для получения методом абляции сериями сдвоенных лазерных импульсов алюминиевых мишеней в воздушной атмосфере нанокластеров алюминия и соединений алюминия, типа AlO и AlN для использования в технологиях получения нанопорошков оксидов и нитридов алюминия.

В большинстве исследований двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии (ЛЭС) используется коллинеарная, или коаксиальная, конфигурация совмещения, когда первый и второй лазерные импульсы фокусируются в одном и том же положении на поверхности образца. Такая конфигурация наиболее удобна для получения нанопорошков, поскольку она наиболее пригодна для ориентации лазерных факелов направляемых как на подложку, так и в объем прибора.

Для проведения исследований использовался лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. В качестве источника абляции и возбуждения приповерхностной плазмы спектрометр включает в себя двухимпульсный неодимовый лазер с регулируемой энергией и интервалом между импульсами (модель LS2131 DM). Лазер обладает широкими возможностями как для регулировки энергии импульсов (до 80 мДж), так и временного сдвига между сдвоенными импульсами (0–100 мкс) излучения. Длительность импульсов ≈ 15 нс. Размер сфокусированного пятна примерно 50 мкм.

При использовании режима сдвоенных импульсов на первичные процессы плазмообразования будут накладываться процессы нагрева и испарения аэрозолей, нанокластеров, фракталов, образовавшихся при воздействии на поверхность объекта излучения первого импульса, вторым импульсом излучения. При использовании серий последовательных импульсов образуется микроканал, работающий как микросопло. Последние эффекты позволяют существенно уменьшить размеры продуктов абляции, образующихся на выходе из сопла, в результате быстрого охлаждения в расширяющемся облаке, вплоть до нанометровых. Образование нанопорошков оксида алюминия с минимальным размером частиц (размером 10–30 нм) достигается при взаимодействии паров металла с кислородом воздуха в условиях интенсивного турбулентного перемешивания образующихся продуктов. Интенсивное охлаждение не только тормозит рост частиц, но и увеличивает скорость образования зародышей конденсированной фазы.

Динамика образования одного из продуктов взаимодействия атомов алюминия с кислородом радикала AlO изучена нами по эмиссионным спектрам этой молекулы при воздействии серии одиночных и сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевую мишень. Наиболее интенсивными электронно-колебательными полосами в эмиссионных спектрах являются полосы с длинами волн 484,21 и 464,82 нм, а линий ионов Al II (466,3 нм), Al III (452,92 нм), O II (407,59 нм).

Динамика образования ионов Al и радикала AlO исследована при воздействии серий (40 импульсов) одиночных и сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевую мишень. Результаты, полученные при энергии импульсов 40 мДж, приведены на рис. 1а. При проведении экспериментальных исследований установлено, что наибольшая интенсивность полос наблюдается для интервала между импульсами 9–15 мкс. С использованием интервала 10 мкс нами проведено исследование процесса образования радикалов AlO от энергии импульсов. Данные проведенных исследований приведены на рис. 1б.

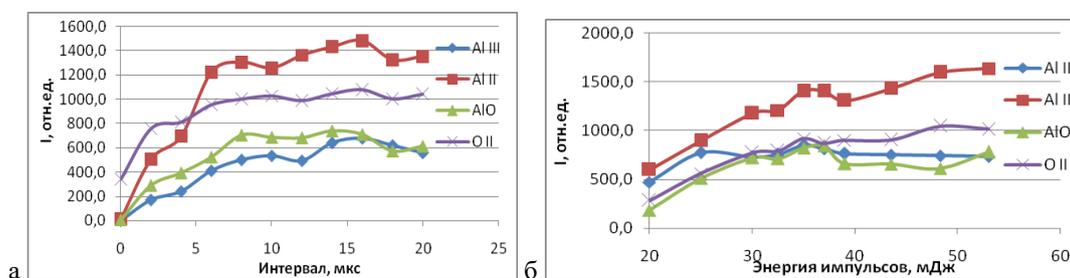


Рисунок 1 – Зависимость интенсивности линий ионов Al II (466,3 нм), Al III (452,92 нм), O II (407,59 нм) и полосы AlO (484,22 нм) от: а – интервала между импульсами; б – энергии импульсов

Как видно из данных, процесс образования радикалов AlO существенно увеличивается до энергии импульсов 40 мДж, а далее несколько уменьшается. Наличие резкого временного порога скорости образования радикалов AlO указывает на то, что причину наблюдаемых явлений необходимо искать в особенностях плазмообразования внутри образующегося достаточно глубокого канала.

Для получения аэрозолей Al и продуктов, образующихся при взаимодействии ионов алюминия с кислородом и азотом воздуха, использовался закрытый стеклянный бокс, куда помещалась мишень из алюминия. Для оценки возможности практического получения нанопорошков были использованы энергия импульсов 40 мДж, интервал между импульсами 10 мкс. Облучение проводили сериями из 50 двоек импульсов, при энергии импульсов 40 мДж в течение 10 минут. Для анализа получаемых продуктов, осевших на поверхность стеклянной пластинки, установленной в стороне от лазерного факела, использовали разработанный светосильный КР спектрометр с гибридной ПЗС системой регистрации [1]. Для снимков продуктов использовался микроинтерферометр Линника МИИ-4 (увеличение в 300 раз).

Данные проведенных исследований представлены на рис. 2.

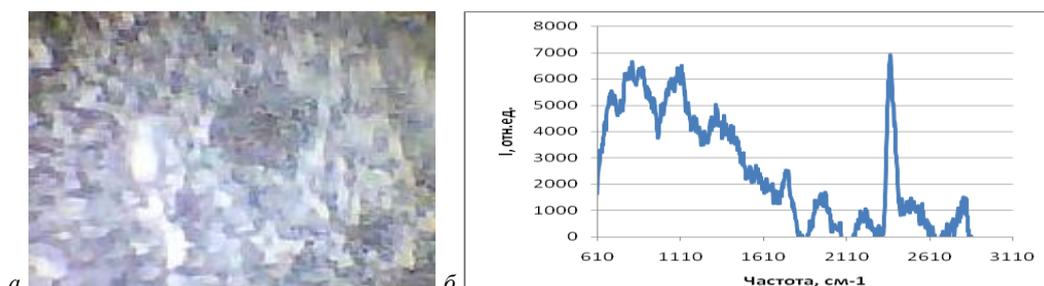


Рисунок 2 – а) снимок продуктов осаждения; б) спектр КР от продуктов в серой точке

Продукты, осевшие на подложку, как видно из снимка агломерированы и слабо взаимодействуют с поверхностью. О последнем факте свидетельствует то, что под действием пучка зеленого лазера ($\lambda = 532$ нм) мощностью 20 мВт через несколько десятков секунд сигнал пропадал (серое место на снимке). В спектре КР наблюдаются линии различных продуктов взаимодействия ионов алюминия с воздухом (область $600\text{--}2300\text{ см}^{-1}$), а также сильная полоса 2370 см^{-1} , принадлежащая молекулам N_2 , адсорбированным на Al_2O_3 . Нитрогруппы на поверхности наночастиц, полученных плазменными методами, возникают в результате реакции оксида металла с оксидами азота, которые образуются во время перемешивания компонентов воздуха с плазмой. В перегретом облаке паров оксида металла азот и кислород воздуха, при недостатке кислорода, способны реагировать, образуя оксиды азота и приводя к появлению нитрогрупп в сконденсировавшихся наночастицах.

Список литературы

1. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – М., 2005. – 416 с.
2. Баззал, Х. Исследование процессов образования нитрида алюминия в плазме в зависимости от угла падения лазерных импульсов на мишень из алюминиевого сплава Д16Т в атмосфере воздуха / Х. Баззал, А. Р. Фадаиян, А. П. Зажогин // Журн. Бел. гос. ун-та. Физика. – 2017. – № 1. – С. 34–42.
3. Коваленко, М. Н. Разработка и применение спектральных приборов с многоканальными фотоприемными устройствами / Я. И. Дидковский, М. Н. Коваленко, А. А. Минько, М. Р. Последович // Вестн. БГУ. Сер. 1. – 2013. – № 3. – С. 20–24.

The effect of an additional laser pulse on the targeted formation of the component and charge composition of the laser plasma by laser spark spectrometry (LSS-1 spectrometer) was studied. The possibility of increasing the proportion of AlO radicals in a laser torch when a series of double pulses are applied sequentially to an aluminum target is shown. The possibility of obtaining aluminum oxides and products of interaction of oxygen and nitrogen in the air in a laser plasma deposited on a glass surface is shown by CR methods.

Баззал Ходор, аспирант четвертого года обучения кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.

Коваленко Максим Николаевич, заведующий лабораторией кафедры физической оптики и прикладной информатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.

Научный руководитель – *Зажогин Анатолий Павлович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, zajogin_an@mail.ru.

БАЗЗАЛ ХОДОР

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ В ПЛАЗМЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАСФОКУСИРОВАННЫХ СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА АЛЮМИНИЕВУЮ МИШЕНЬ В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА

Проведены исследования влияния расфокусировки сдвоенных лазерных импульсов на формирование компонентного и зарядового состава в лазерной плазме Al методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии (ЛАЭМС). Показана возможность увеличения доли ионов алюминия, кислорода и азота при последовательном воздействии серий расфокусированных сдвоенных импульсов на алюминиевую мишень в воздухе и получения необходимых концентраций нанопорошка Al с различным содержанием оксидов и нитридов алюминия.

Одним из потенциально эффективных способов аккумуляции энергии является использование промежуточных энергоносителей, которые позволят также уменьшить затраты на экологию при распределении энергии. Удельные экономические показатели источников энергии на основе альтернативных в настоящее время значительно уступают аналогичным показателям традиционной энергетики. Это побуждает искать новые пути решения задач повышения эффективности, экономичности, надежности нетрадиционных источников энергии, снижения капитальных и эксплуатационных затрат и т. п. Не вызывает сомнения, что уже в ближайшей перспективе человечество будет вынуждено во всевозрастающих объемах использовать энергию возобновляемых источников энергии (ВИЭ), которые, как правило, расположены на значительном удалении от традиционных мест обитания людей и от мест потребления энергии. Эффективное освоение ВИЭ требует разработки технологий аккумуляции производимой ими энергии, а также новых способов ее транспортировки к местам локализации потребителей энергии. Одним из перспективных материалов в качестве нетрадиционного энергоносителя в широком диапазоне мощностей источников энергии, чрезвычайно перспективным инструментом для решения этих задач может быть нанопорошок алюминия.

Анализ и целенаправленное изменение компонентного, зарядового и энергетического распределения состава лазерного факела возможно на основе воздействия на первичную плазму дополнительного лазерного излучения. При двухимпульсном лазерном воздействии при различных углах падения луча на мишень и плазму возможно одновременное проведение высокочувствительного спектрального анализа, контроля концентрации возбужденных и заряженных частиц плазмы и управления составом плазмы, направляемой на подложку.

Цель работы состояла в том, чтобы показать возможность и определить условия получения методом абляции сериями сдвоенных лазерных импульсов алюминиевых мишеней в воздушной атмосфере нанопорошков Al которые могут быть используемые в технологии получения альтернативной энергии.

Для проведения исследований использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1 (изготовитель СП «ЛОТИС ТИИ»). Лазер может работать с частотой повторения импульсов до 10 Гц на длине волны 1064 нм. Длительность импульсов ≈ 15 нс. Временной сдвиг между сдвоенными импульсами может меняться от 0 до 100 мкс с шагом 1 мкс. Размер сфокусированного пятна примерно 50 мкм, при фокусном расстоянии объектива 104 мм.

Динамика образования продуктов изучена нами с использованием наиболее интенсивных электронно-колебательными полос AlO и AlN в эмиссионных спектрах с длинами волн AlO (484,21 нм) и AlN (507,82 нм), b линий ионов Al II (466,3 нм), Al III (452,92 нм), O II (407,59 нм), N II (399,5 нм).

нитрида алюминия изучена нами по эмиссионной полосе AlN длиной волны 508,0 нм при воздействии серии одиночных и сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевую мишень в атмосфере воздуха.

При проведении экспериментальных исследований установлено, что наибольшая интенсивность полос наблюдается при интервале между импульсами 6–12 мкс. С использованием интервала 8 мкс нами проведено исследование процесса образования нанокластеров AlN и ионов N II в зависимости от расфокусировки и числа лазерных импульсов. Данные приведены на рисунке 1.

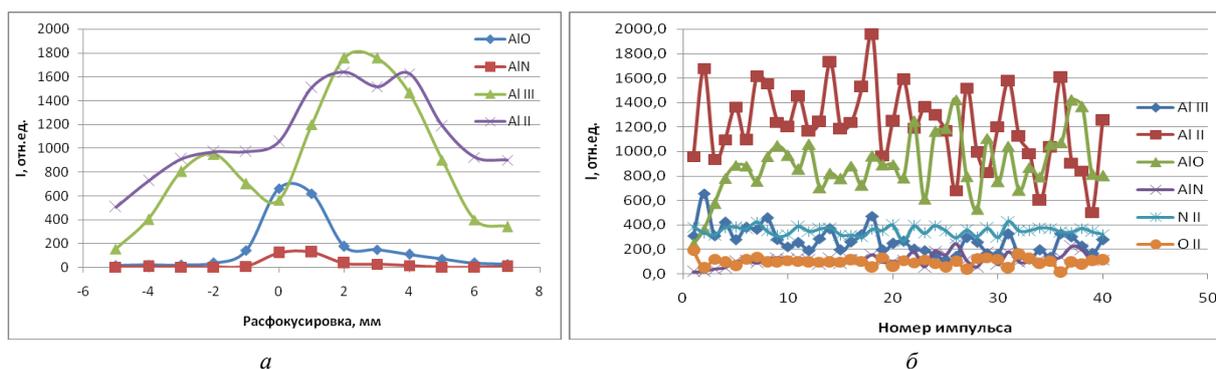


Рисунок 1 – а) зависимость интенсивности линий ионов Al II (466,3 нм), Al III (452,92 нм), полос AlO (484,21 нм) и AlN (508,0 нм), б) зависимость интенсивности линий Al II, Al III, O II и N II и полос AlO и AlN от номера импульса

Как видно из полученных данных, сопоставление графиков на рисунке 1а показывает хорошую корреляцию между возрастанием интенсивности полосы AlO и существенным уменьшением интенсивности линии Al III (452,92 нм).

Скорость образования субоксида алюминия очень сильно зависит как от величины расфокусировки, так и от количества последовательных сдвоенных импульсов.

Следует отметить, что образования AlN и радикалов AlO в плазме при большой расфокусировке практически незаметно. Интенсивность полос AlO и AlN при расфокусировке более 1–2 мм изменяется очень мало, что свидетельствует о практически полном отсутствии их образования AlN в лазерной плазме даже при большом содержании ионов активированного азота и кислорода.

Очевидно, что чем жестче фокусировка и больше энергия импульсов излучения, тем в более ранние моменты времени плотность лазерного излучения на мишени достигнет пороговой, и образовавшийся факел будет эффективно поглощать энергию. С увеличением расфокусировки плотность энергии уменьшается, время воздействия излучения увеличивается, и объем выброшенного материала также будет возрастать. Однако с расфокусировкой уменьшается плотность энергии в точке воздействия лазерных импульсов, что в свою очередь влияет на количественный и качественный состав плазмы. При изменении энергии накачки и задержки между импульсами форма зависимостей принципиально не изменялась.

Полученный результат может быть объяснен тем, что наибольшее влияние в данном случае оказывает плотность энергии в месте приложения излучения к поверхности, а также форма кратера (при расфокусировке вглубь пластины). Следует отметить, что с расфокусировкой интенсивности ионных линий алюминия уменьшаются значительно медленнее, чем интенсивности нитрида и оксида алюминия, что говорит о большей зависимости образования молекулярных соединений в плазме от плотности мощности и геометрии кратера.

Для получения аэрозолей Al и продуктов, образующихся при взаимодействии ионов алюминия с кислородом и азотом воздуха, использовался закрытый стеклянный бюкс, куда помещалась мишень из алюминия. Для оценки возможности практического получения нанопорошков были использованы энергия импульсов 40 мДж, интервал между импульсами 10 мкс. Облучение проводили сериями из 50 сдвоенных импульсов, при энергии импульсов 40 мДж в течение 10 минут. Для снимков продуктов осаждения использовался микроинтерферометр Линника МИИ-4 (увеличение в 300 раз).

Данные проведенных исследований представлены на рис. 2.



Рисунок 2 – Снимок поверхности стеклянной подложки: а) при воздействии сфокусированных лазерных импульсов, б) расфокусированных на +4 мм

Из снимка 2а видно, что продукты, включающие в себя оксиды и нитриды алюминия, имеют большую склонность к агломерации, чем практически цельнометаллические порошки алюминия (рис. 2б), покрытые только тонким слоем оксида алюминия.

Таким образом, выполненные спектроскопические исследования характеристик лазерной плазмы, образуемой при воздействии серии последовательных расфокусированных сдвоенных лазерных импульсов на поверхность алюминиевой мишени, показали возможность контроля и управления характеристиками плазмы и возможность получения необходимых концентраций нанопорошка Al с различным содержанием оксидов и нитридов алюминия.

Список литературы

1. Ильин, А. П. К вопросу о механизме высокотемпературного химического связывания азота воздуха / А. П. Ильин, Л. О. Рот // Вестн. науки Сибири. Сер. 3, Химия. – 2011. – № 1 (1). – С. 91–96.

The influence of the defocusing of twin laser pulses on the formation of the component and charge composition in the Al laser plasma by the method of laser atomic emission multichannel spectrometry (LAEMS) has been studied. It is shown that it is possible to increase the proportion of aluminum, oxygen, and nitrogen ions when a series of defocused double pulses are applied sequentially to an aluminum target in the air and to obtain the necessary concentrations of Al nanopowder with different contents of aluminum oxides and nitrides.

Базал Ходор, аспирант четвертого года обучения кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.

Лычковский Вячеслав Валерьевич, магистрант 1 года обучения, кафедра лазерной физики и спектроскопии физического факультета Белорусского государственного университета.

Научный руководитель – *Зажогин Анатолий Павлович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, zajogin_an@mail.ru.

УДК 535.33+544.6

Н. В. БЕЛЬКО, А. М. МАЛЬТАНОВА

ФОТОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ НАНОРАЗМЕРНЫХ Н*-АГРЕГАТОВ ИНДОТРИКАРБОЦИАНИНОВОГО КРАСИТЕЛЯ

Н*-агрегаты индотрикарбоцианинового красителя характеризуются узкой коротковолновой полосой поглощения и проявляют фотоэлектрохимическую активность при нанесении на подложки. Они представляют собой наноразмерные объекты и могут быть использованы при создании элементов молекулярной наноэлектроники.

Широкое применение цианиновых красителей в науке и технике обусловлено их оптическими и электрохимическими свойствами [1; 2]. Агрегаты некоторых цианиновых красителей представляют собой наноразмерные объекты и имеют потенциал для применения в качестве солнечных элементов, фотодиодов, компонентов молекулярной электроники [3; 4].

Исследуемое соединение представляет собой симметричный катионный индотрикарбоцианиновый краситель, синтезированный в НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ. Для получения достаточно концентрированных растворов проводится длительная обработка (~100 мин.) ультразвуком (частота 35 кГц, мощность 60 Вт) водной суспензии красителя. При этом часть молекул переходит в растворенное состояние, что подтверждается проявлением в спектре поглощения полос красителя. После завершения ультразвуковой обработки наблюдается седиментация нерастворенных частиц красителя. Через ~10 суток после приготовления однородный раствор красителя декантируют и используют в экспериментах. Проведенный анализ хромато-масс-спектров образцов красителя до и после ультразвуковой обработки в водной среде показал неизменность структуры молекул красителя. Фотоэлектрохимические измерения производятся для образцов красителя, нанесенных из водного раствора на стеклянную подложку с проводящим слоем SnO₂:F. Высушенный в естественных условиях электрод погружают в водный раствор 0,25 М сульфата натрия и 2 мМ гидрохинона. Регистрация спектра фотодействия осуществляется при потенциале 0,25 В относительно стандартного каломельного электрода.

В спектре поглощения водного раствора красителя проявляется две основные полосы (рисунок 1, кривая 1). Длинноволновая полоса с основным максимумом при 680 нм и большой полушириной обусловлена суперпозицией поглощения мономеров и димеров [5]. Узкая интенсивная полоса при 514 нм соответствует Н*-агрегатам красителя [5]. При нанесении красителя на подложку в спектре поглощения проявляется аналогичный набор полос (рисунок 1, кривая 2), однако с иными относительными интенсивностями. Все

максимумы поглощения красителя на подложке смещены в длинноволновую область вследствие взаимодействия с материалом подложки.

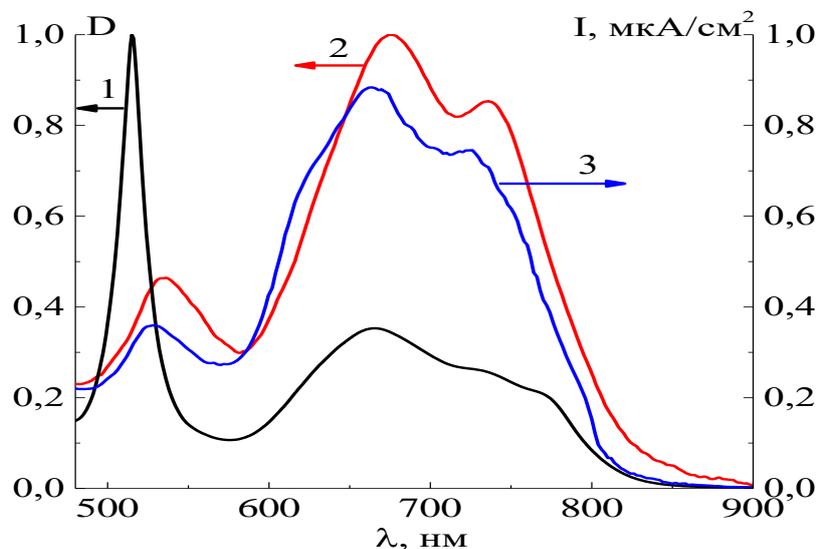


Рисунок 1 – Нормированный спектр поглощения водного раствора индотрикарбацианинового красителя, полученного с помощью ультразвукового воздействия, через 10 суток после приготовления – (1), концентрация красителя 0,1 мМ; нормированный спектр поглощения красителя, нанесённого на подложку из водного раствора – (2); спектр фотодействия красителя на SnO₂:F-подложке в контакте с раствором электролита – (3)

Спектр фотодействия образца красителя на подложке по форме повторяет спектр поглощения данного образца (рисунок 1, кривая 3). Все формы красителя генерируют фототок под действием внешнего излучения. Максимумы в спектре фотодействия батохромно смещены на ~10 нм в результате взаимодействия красителя с электролитом.

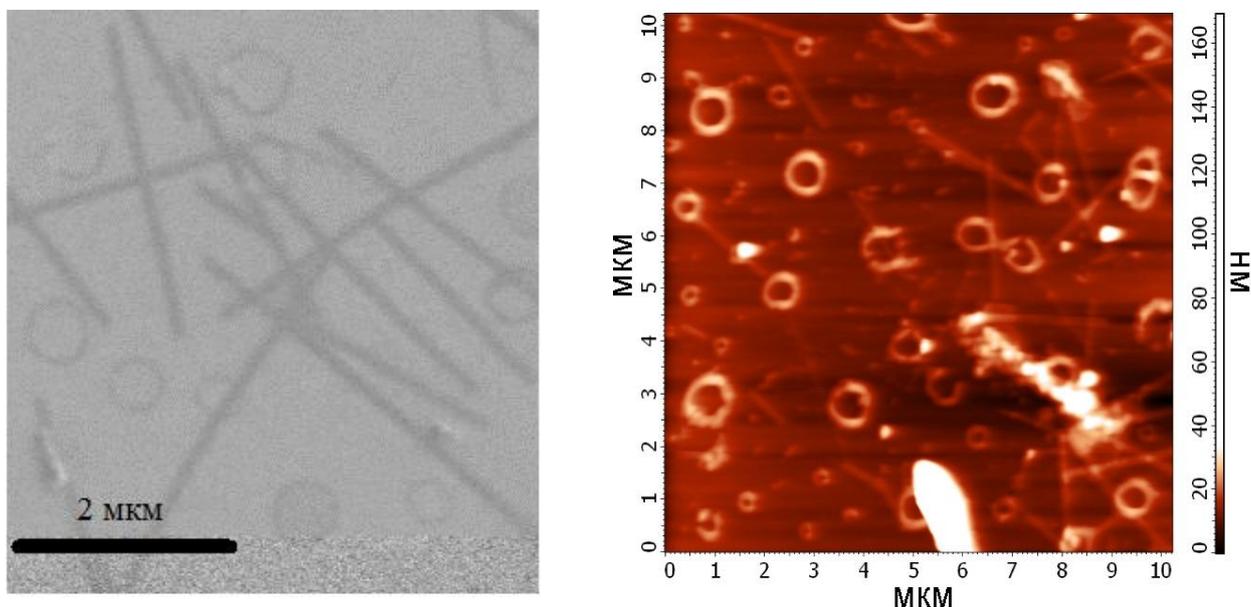


Рисунок 2 – Морфология наноструктур индотрикарбацианинового красителя: а) микрофотография с растрового электронного микроскопа; б) микрофотография с атомно-силовой микроскопии

Согласно микрофотографиям, полученным с помощью растровой электронной и атомно-силовой микроскопии, в образце красителя на подложке присутствуют наноразмерные объекты двух типов (рисунок 2):

- (1) стержнеобразные наноструктуры толщиной ~10 нм, шириной ~100 нм и длиной несколько микрометров;
 (2) кольцеобразные наноструктуры диаметром ~ 1 мкм и толщиной ~10 нм.

Профили поперечного сечения наноструктур двух типов совпадают, следовательно, вторые образуются из первых в растворе или в результате взаимодействия с подложкой. Оба типа наноструктур соотносятся с H*-агрегатами красителя.

Таким образом, H*-агрегаты индотрикарбоцианинового красителя представляют собой наноразмерные объекты, обладают узкой полосой поглощения в коротковолновой области и проявляют фотоэлектрохимическую активность. Существование нескольких форм красителя – мономеров, димеров и H*-агрегатов – позволяет генерировать фототок в широком спектральном диапазоне от 500 до 900 нм.

Работа частично выполнена при поддержке БРФФИ, проект Ф19М-074.

Список литературы

1. Kirstein, S. Cyanine dyes: J-aggregates of amphiphilic cyanine dyes: Self-organization of artificial light harvesting complexes / S. Kirstein, S. Dähne // *Int. J. Photoenergy*. – 2006. – Vol. 2006, № 20363. – P. 1–21.
2. Parton, L. R. Dimerization reactions of cyanine radical dications / L. R. Parton, J. R. Lenhard // *J. Org. Chem.* – 1990. – Vol. 55, № 1. – P. 49–57.
3. Ishchenko, A. A. Structure and spectral-luminescent properties of polymethine dyes / A. A. Ishchenko // *Russ. Chem. Rev.* – 1991. – Vol. 60, № 8. – P. 865–884.
4. Würthner, F. J-aggregates: from serendipitous discovery to supramolecular engineering of functional dye materials / F. Würthner, T. E. Kaiser, C. R. Saha-Möller // *Angew. Chem. Int. Ed.* – 2011. – Vol. 50, № 15. – P. 3376–3410.
5. Спектрально-люминесцентные свойства и морфология самоорганизованных наноструктур индотрикарбоцианинового красителя / Н. В. Белько [и др.] // *Журн. прикл. спектр.* – 2018. – Т. 85, № 6. – С. 868–878.

H*-aggregates of an indotricarbocyanine dye are characterized by a narrow short-wave absorption band and are able of generating photocurrent when immobilized on a substrate. The aggregates comprise nanoscale objects and can be utilized in molecular nanoelectronics.

Белько Никита Викторович, аспирант физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, nikita.belko@gmail.com.

Мальтанова Анна Михайловна, кандидат химических наук, научный сотрудник НИИФХП Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, annamaltanova@gmail.com.

Научные руководители – *Самцов Михаил Петрович*, доктор физико-математических наук, доцент, НИИПФП им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, samtsov@mail.ru.

Позняк Сергей Кондратьевич, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, НИИФХП Белорусского государственного университета, roznyak@bsu.by.

УДК 544.35:547.427.2

К. Ю. ВАЩЕНКО, Р. О. САЕНКО, О. В. САЕНКО

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЯЗКОГО ТЕЧЕНИЯ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ РИБИТА И КСИЛИТА

В работе на основании полученных экспериментальных данных о плотности и вязкости проведены расчёты термодинамических характеристик вязкого течения водных растворов рибита и ксилита, а также времени релаксации сдвиговой вязкости.

Объектом нашего исследования являются водные растворы пятиатомных спиртов (полиолов) с общей формулой C₅H₁₂O₅, рибита (адонита) и ксилита, которые являются изомерами. Выбор объектов обусловлен их широким использованием в современных технологических процессах [1; 2; 3]. Обладая хорошей растворимостью в воде, эти вещества позволяют исследовать особенности теплового движения и молекулярного строения достаточно концентрированных водных растворов. Нами исследованы растворы рибита с концентрациями 20, 30, 40, 50 масс. % и растворы ксилита с концентрациями 20, 30, 40, 50, 60 масс. %.

Растворы были приготовлены из дважды дистиллированной воды, рибита и ксилита (чистота 99%) имеющих температуры плавления $T_{пл} \approx 102 \text{ }^\circ\text{C}$ и $T_{пл} \approx 120 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно.

Измерения кинематической вязкости проводились с помощью капиллярного вискозиметра [4], в интервале температур 283–363 К. Плотность определяли с помощью пикнометра, прежде проградуированного дважды дистиллированной водой. Все необходимые взвешивания проводились на аналитических весах AS фирмы «RADWAG». Термостатирование осуществлялось циркуляционным термостатом серии LOIP LT-316. Температура поддерживалась с точностью $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Измерения вязкости и плотности проводили в соответствии с методиками, описанными в [4; 5].

Результаты экспериментальных исследований проиллюстрируем на примере рибита, поскольку для ксилита полученные зависимости имеют подобный вид. На рисунке 1 представлены температурные значения плотности рибита различных концентраций, а на рисунке 2 значения коэффициента динамической вязкости.

Анализ результатов измерения плотности показал, что плотность растворов рибита и ксилита закономерно уменьшается при увеличении температуры и увеличивается с увеличением концентрации. Увеличение плотности при увеличении концентрации происходит по линейному закону.

Вязкость растворов носит типичный экспоненциальный характер, как и большинство жидкостных систем. По уравнению Эйринга нами были рассчитаны термодинамические параметры активации вязкого течения [5; 6].

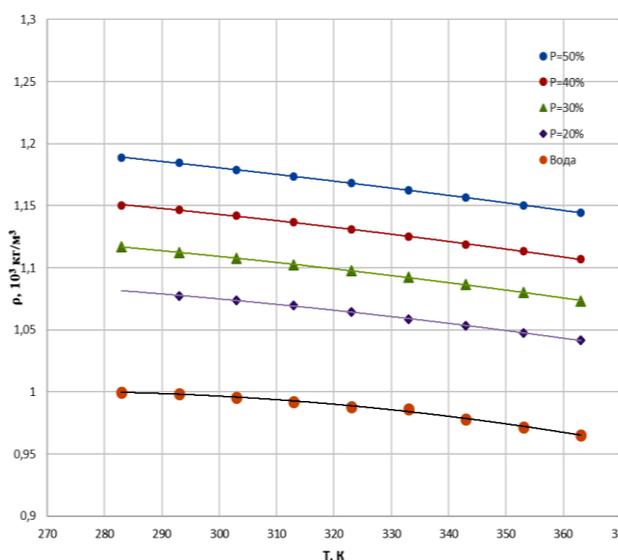


Рисунок 1 – Зависимости плотности водных растворов рибита различных концентраций от температуры

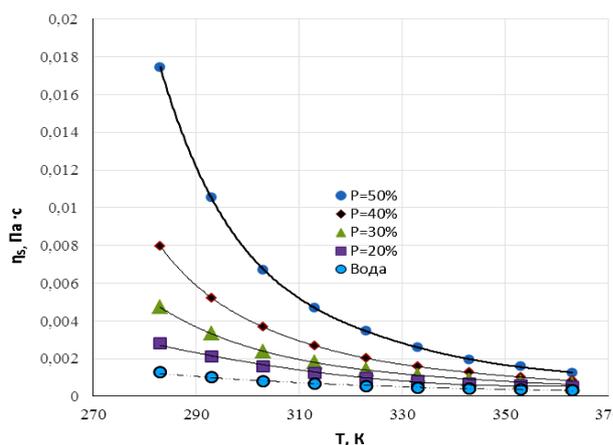


Рисунок 2 – Зависимости коэффициента вязкости водных растворов рибита различных концентраций от температуры

$$\Delta G_{\eta_s}^\ddagger = RT \ln(\eta_s V_\mu / h N_A) = RT \ln(v \mu / h N_A),$$

где v – кинематическая вязкость, μ – молярная масса. Поскольку $\Delta G_{\eta_s}^\ddagger = \Delta H_{\eta_s}^\ddagger - T \Delta S_{\eta_s}^\ddagger$, то величину энтропии определяют как $\Delta H_{\eta_s}^\ddagger = R \partial \ln v / \partial T^{-1}$, при таком подходе величину $\Delta H_{\eta_s}^\ddagger$ рассчитывают, используя экспериментальные данные кинематической вязкости, а величины $\Delta S_{\eta_s}^\ddagger$ и $\Delta G_{\eta_s}^\ddagger$ не являются истинными, так как зависят от трансмиссионного коэффициента χ , их называют эмпирическими и обозначают $\Delta S_{\eta_s}^{\ddagger y}$ и $\Delta G_{\eta_s}^{\ddagger y}$. Истинные же значения величин $\Delta S_{\eta_s}^\ddagger$ и $\Delta G_{\eta_s}^\ddagger$ легче рассчитать когда, $\Delta G_{\eta_s}^\ddagger = 0$ и $\Delta H_{\eta_s}^\ddagger = T_k^\ddagger \Delta S_{\eta_s}^\ddagger$. Здесь T_k^\ddagger – изокINETическая температура, в большинстве случаев она остается неизвестной. Поэтому для определения истинных значений $\Delta S_{\eta_s}^\ddagger$ и $\Delta G_{\eta_s}^\ddagger$ пользуются линейной зависимостью между изменением энтальпии и энтропии – кинетическим компенсационным эффектом $\Delta H_{\eta_s}^\ddagger = A + T_k^\ddagger \Delta S_{\eta_s}^\ddagger$. Здесь A – длина отрезка, который прямая отсекает по оси ординат, а отрезок, отсекаемый по оси абсцисс, равен $R \ln 4\pi e \chi$ [6; 7].

Величину A легко определить, построив зависимость энтальпии вязкого течения от энтропии вязкого течения. Так, для растворов ксилита $A = 37,7 \text{ кДж/моль}$, а для растворов рибита $A = 9,4 \text{ кДж/моль}$. Рассчитываем значения трансмиссионного коэффициента $\chi = 1,3 \cdot 10^{-5}$ и $\chi = 9,5 \cdot 10^{-3}$ соответственно для ксилита и рибита. ИзокINETическая температура определяется по углу наклона прямых и составляет для ксилита $T_k^\ddagger = 620 \text{ К}$ и $T_k^\ddagger = 570 \text{ К}$ для рибита.

Значения энтальпии и эмпирической энтропии используют для получения зависимости,

представленной на рисунке 1. Тогда между эмпирическими и истинными величинами имеют место соотношения $\Delta S_{\eta_s}^{\#} = \Delta S_{\eta_s^{\#}}^{\#} - R \ln 4\pi e \chi$, $\Delta G_{\eta_s}^{\#} = \Delta G_{\eta_s^{\#}}^{\#} + RT \ln 4\pi e \chi$.

Результаты расчетов термодинамических характеристик вязкого течения исследованных объектов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Вещество	P, масс. %	$\Delta H_{\eta_s}^{\#}$, кДж моль	$\Delta G_{\eta_s^{\#}}^{\#}$, кДж моль	$\Delta S_{\eta_s^{\#}}^{\#}$, Дж моль × К	$\Delta G_{\eta_s}^{\#}$, кДж моль	$\Delta S_{\eta_s}^{\#}$, Дж моль × К	$\tau_s, 10^{-12}$ с
Рибит	20	21	12,6	27,5	9,8	36,9	7,7
	30	23,3	13,8	31,3	11,0	40,6	12,5
	40	27,3	15,6	38,5	12,8	47,9	25,5
	50	31,0	17,4	45,0	14,5	54,4	50,1
Ксилит	20	16,8	28,3	-38,0	7,6	30,1	3,3
	30	18,3	29,4	-36,9	8,8	31,3	5,2
	40	22,5	30,9	-27,7	10,2	40,5	9,3
	50	25,2	32,7	-24,8	12,1	43,4	19,0
	60	35,5	36,4	-2,8	15,7	65,3	81,2

Рассчитанные значения свободной энергии активации вязкого течения позволяют определить время релаксации сдвиговой вязкости водных растворов ксилита и сорбита. Полученные нами по

формуле $\tau_s = \frac{h}{kT} \exp\left(\frac{\Delta G_{\eta_s}^{\#}}{RT}\right)$ значения τ_s для всех исследованных концентраций при температуре в 303 К

представлены в таблице 1. Из таблицы 1 видим, что время релаксации сдвиговой вязкости очень сильно возрастает при увеличении концентрации растворов.

Список литературы

1. Ghosh, S. A review on polyols: new frontiers for health-based bakery products / S. Ghosh, M. L. Sudha // International Journal of Food Sciences and Nutrition. – 2012. – № 63 (3). – P. 372–379.
2. Metzger, Jürgen. O. Production of Liquid Hydrocarbons from Biomass / Jürgen O. Metzger // Angewandte Chemie International Edition. – 2006. – Vol. 45, № 5. – P. 696–698.
3. Технологія борошняних кондитерських і хлібобулочних виробів : навч. посіб. / ред. Г. М. Лисюк. – Суми : Університетська книга, 2013. – 464 с.
4. Пат. України на корисну модель № 94735 МПК G01N 11/00/2014. Пристрій для вимірювання в'язкості рідких речовин / Р. О. Саснко, О. П. Руденко, А. М. Гетало, О. В. Саснко, С. В. Степаненко ; заявники і патентовласники Р. О. Саснко, О. В. Саснко, С. В. Степаненко. – № u201406993 ; заявл. 23.06.2014, опубл. 25.11.2014. Бюл. № 22.
5. Основы реологии : лаб. практикум для студентов физического факультета по специальности «Молекулярная физика» / сост.: Л. А. Булавин [и др.]. – Киев : Изд.-полиграф. центр «Киевский университет», 2001. – 56 с.
6. Глестон, С. Теория абсолютных скоростей реакций / С. Глестон, К. Лейдер, Г. Эйринг. – М. : И. Л., 1948. – С. 581.
7. Шахпаронов, М. И. Механизмы быстрых процессов в жидкостях / М. И. Шахпаронов. – М. : Высш. шк., 1980. – 352 с.

On the basis of viscosity experimental data, we have calculated the enthalpy, entropy, free energy and relaxation time in aqueous solutions of ribitol and xylitol.

Ващенко Кристина Юрьевна, студентка физико-математического факультета Полтавского национального педагогического университета имени В. Г. Короленко, Полтава, Украина, rpru20@gmail.com.

Саенко Роман Олегович, аспирант Полтавского национального педагогического университета имени В. Г. Короленко, Полтава, Украина, saenkoroman89@gmail.com.

Научный руководитель – Саенко Олег Васильевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Полтавский национальный педагогический университет имени В. Г. Короленко, Полтава, Украина, Saenkooleg1966@gmail.com.

М. С. ВЕРБИЦКАЯ, Н. В. ЖИДКИНА, Ю. В. ЗАПОРОЖЧЕНКО, А. В. АКСЮЧИЦ

МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ В ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЕ АТМОСФЕРНОГО РАЗРЯДА

Исследовалось влияние плазмы диэлектрического барьерного разряда на поверхностные свойства полиметилметакрилата (ПММА). После обработки плазмой диэлектрического барьерного разряда в зависимости от времени обработки на ПММА проявляются гидрофобные и гидрофильные свойства. За 1 минуту обработки адгезия поверхности ПММА увеличилась в 2 раза.

Обработка поверхностей плазмой диэлектрического барьерного разряда – это экологически чистая и безвредная технология как для обрабатываемой поверхности, так и для окружающей среды. Низкий температурный режим делает плазменный метод пригодным для обработки практически всех материалов, даже самых чувствительных. К таким чувствительным материалам относится полиметилметакрилат (ПММА, другие названия: оргстекло, плексиглас, акрил), который используют в медицине, микро- и нанoeлектронике, строительстве и многих других сферах. Для многих процессов в которых используется данный полимер, большое значение имеет адгезия поверхности. Плазменная обработка поверхности модифицирует свойства поверхности без изменения свойств самого материала: можно создать гидрофобную, гидрофильную поверхность с необходимыми свойствами.

Исследование влияния плазмы атмосферного разряда на поверхностные свойства ПММА проводилось с помощью экспериментальной установки, структурная схема которой представлена на рисунке 1. Установка включает баллон с плазмообразующим газом аргоном (1), регулятор расхода газа РРГ-12 (2), обрабатываемую подложку (3), штатив (4), источник питания (5) и разрядную систему (6). В установке используется разрядное устройство коаксиального типа с диэлектрическим барьерным разрядом для создания плазмы диффузного типа при атмосферном давлении. Данная система позволяет формировать плазменный факел длиной до 3 см, с зоной обработки диаметром до 1 см [1].

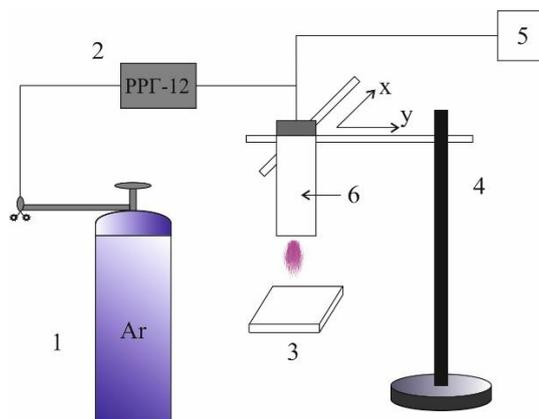


Рисунок 1 – Схематичное изображение экспериментальной установки

Проводилось исследование влияния плазмы на поверхностные свойства ПММА в зависимости от времени обработки.

Для оценки изменения адгезии полимера при обработке в плазме диэлектрического барьерного разряда использовался атомно-силовой микроскоп NT-206. С помощью АСМа измерялась сила трения и коэффициент трения поверхности. Этот метод основан на измерении угла закручивания кремниевой консоли зонда вокруг своей оси под действием сил трения между поверхностью и его острием. Определение величины этого угла закручивания позволяет рассчитать коэффициент трения, а также силу трения при дополнительной калибровке величины изгиба консоли в единицах силы [2].

Фиксируя величину этого угла закручивания, с помощью программы Excel был рассчитан коэффициент трения поверхности ПММА.

Обработка поверхности полимера проводилась при мощности разряда 45 Вт, расходе аргона 186 л/ч и расстоянии между образцом и разрядным устройством 1 см.

Влияние плазменной обработки на поверхностные свойства полимера можно отследить с помощью 2D и 3D изображений поверхности ПММА, полученных на атомно-силовом микроскопе. На полученных

изображениях (рис. 2 и 3) видно, что морфология поверхности ПММА изменяется в зависимости от времени обработки.

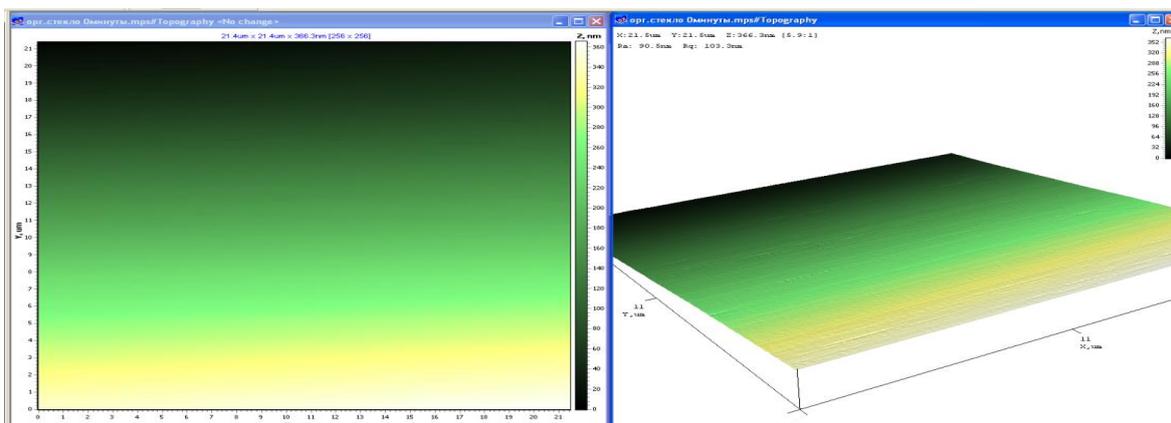


Рисунок 2 – 2D и 3D изображения поверхности ПММА без обработки плазмой

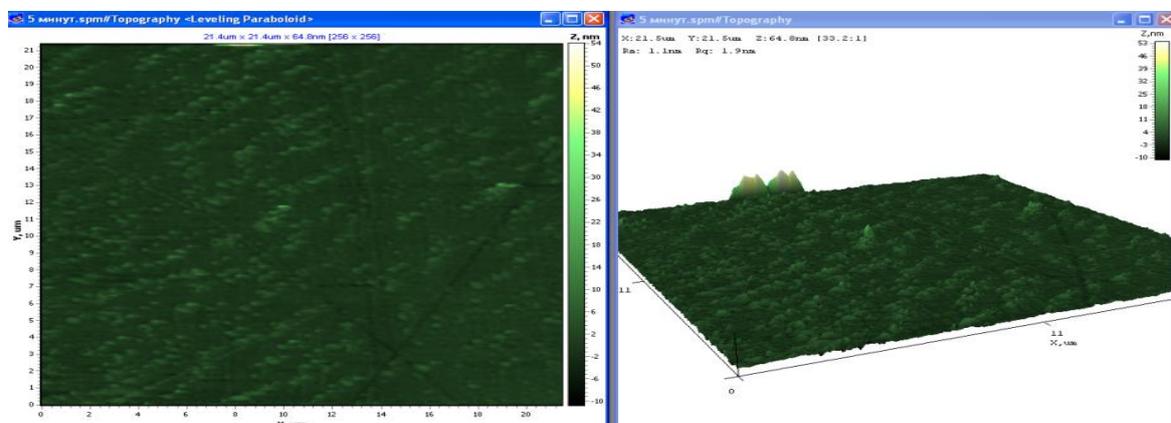


Рисунок 3 – 2D и 3D изображения поверхности ПММА после обработки плазмой в течение 5 минут

Для количественного описания влияния плазменной обработки на поверхностные свойства ПММА был построен график зависимости изменения коэффициента трения поверхности от времени обработки.

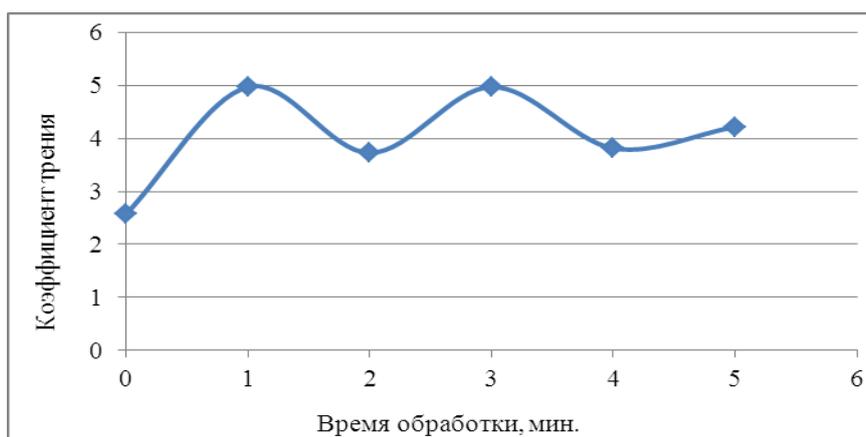


Рисунок 4 – Изменение коэффициента трения от времени обработки

Из графика следует, что при увеличении времени обработки ПММА до 1 минуты увеличивается коэффициент трения и улучшается адгезия. Затем при дальнейшей обработке на поверхности образца образуется графитоподобный углерод, что ухудшает адгезию – участок на графике от 1 до 2 минут. В процессе

обработки выделяется газ CO_x . Также от времени обработки на ПММА проявляются гидрофобные и гидрофильные свойства – процесс циклический, т. к. полиметилметакрилат является органическим веществом.

Из данного графика видно, что максимум коэффициента трения достигается после 1 и 3 минут обработки. На изображениях морфологии поверхности также заметно, что при этих режимах обработки наблюдается наибольшее изменение поверхности. Полученные данные свидетельствуют о том, что поверхность ПММА изменяется под действием плазмы нелинейно. Вероятнее всего это связано с тем, что из-за структуры полимера во время обработки поверхности ПММА происходят не только очистка и активация, но также «сшивка» – соединение разорванных полимерных цепочек, что предотвращает появление свободных радикалов. Под влиянием плазмы длинные полимерные цепочки разрываются (происходит увеличение адгезии), а при дальнейшем воздействии «сшиваются» между собой в новые полимерные цепочки (уменьшение адгезии) [3].

Во время обработки поверхности ПММА в плазме диэлектрического барьерного разряда коэффициент трения поверхности увеличился в 2 раза за 1 минуту. Также было замечено, что поверхностные свойства ПММА изменяются циклично, что позволяет управлять адгезией в зависимости от времени обработки. При использовании данной технологии можно получать более качественные покрытия на поверхности ПММА.

Список литературы

1. Котов, Д. А. Изучение параметров плазменной струи генерируемой диэлектрическим барьерным разрядом / Д. А. Котов, Я. И. Шукевич, О. С. Сигаёв // Молодёжь в науке – 2016 : материалы междунар. конф. – Минск : Бел. наука, 2017. – С. 348–356.
2. Миронов, В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии : учеб. пособие / В. Л. Миронов. – Нижний Новгород : РАН, 2004. – 110 с.
3. Rory, A. Wolf. Atmospheric Pressure Plasma for Surface Modification / A. Wolf Rory. – Wiley, 2013. – 244 p.

Вербицкая Маргарита Сергеевна, студентка факультета радиотехники и электроники (кафедра микро- и нанoeлектроники) Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, margarver1999@gmail.com.

Жидкина Наталья Владимировна, студентка факультета радиотехники и электроники (кафедры микро- и нанoeлектроники) Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, natali.zhidkina.16@gmail.com.

Запорожченко Юлия Владимировна, магистрант кафедры микро- и нанoeлектроники факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, yliyazapozhchenko@gmail.com.

Аксюцц Александр Владимирович, магистрант кафедры микро- и нанoeлектроники факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, alex.akl1996@mail.ru.

Научный руководитель – *Котов Дмитрий Анатольевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, kotov@bsuir.by.

УДК 621.9.048.7

П. А. ВИШНЕВСКИЙ

МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

В исследовании возбуждение и анализ элементного состава образцов цветных металлов осуществлялись спектроанализатором LIBS. Металлы, а также их сплавы широко используются в разных отраслях промышленности и народного хозяйства. В чистом виде металлы практически не существуют – они обязательно имеют в своем составе природные или технологические примеси. От их типа и концентрации зависят эксплуатационные параметры будущей продукции, которая производится из металла. В сфере производства металлов и сплавов спектральные методы применяют для определения основного элементного состава и содержания примесей в готовой продукции или в исходном сырье. В работе использовался метод эмиссионно-спектрального анализа, который обладает рядом преимуществ.

Эмиссионный спектральный анализ основан на том, что анализируемый образец переводится в атомарное состояние, затем атомные пары разогреваются и переводятся в плазму. Оптическое излучение плазмы содержит спектральные линии, по которым идентифицируется элементный состав образца металла. Соотношение интенсивностей спектральных линий служит мерой количественного соотношения элементов в плазме и соответственно в образце. Температура, плотность электронов и излучательные характеристики образующегося лазерного факела существенно зависят от параметров импульса лазерного излучения – длительности, энергии, плотности мощности.

Образцы исследуемых металлов алюминия (Al) и меди (Cu), предварительно подвергались тщательной шлифовке и полировке вплоть до зеркальной поверхности на образцы воздействовали излучением ИАГ:Nd³⁺ лазера, с энергией 30 мДж в одноимпульсном режиме. После лазерного воздействия на поверхности образцов формировался кратер. Микроскопические снимки образцов меди при одномпульсном возбуждении приведены на рисунке 1.

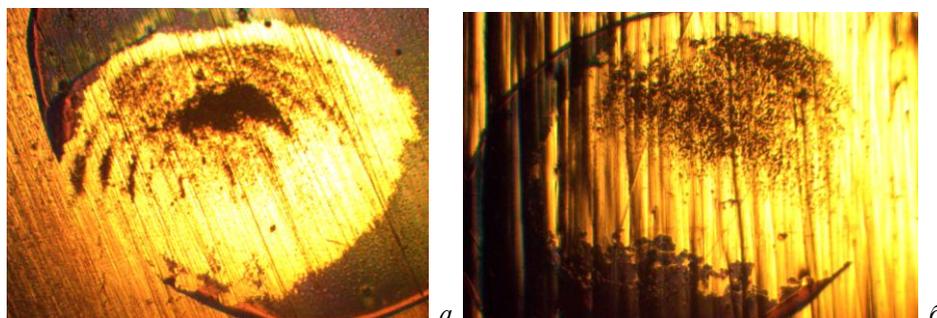


Рисунок 1 – Микроснимки зон термического влияния и кратеров на образцах алюминия (а) и меди (б)

Как видно из рисунков, формы кратеров и размеры зон термического влияния различаются. Параметры образовавшегося кратера: диаметр и его глубина исследовались на оптическом микроскопе с увеличением в 10 раз.

Далее для исследованных образцов проводились расчеты диаметра (d) и глубины (h) кратера по соответствующим формулам [4]:

$$d = d_0 + Pt \frac{\operatorname{tg} 2\gamma}{\pi(d_0 L)} \quad (1)$$

где P – импульсная мощность, L – теплота испарения, 2γ – угол раствора светового конуса, d_0 – диаметр светового пятна на поверхности мишени, t – длительность воздействия лазерного излучения.

$$h = \frac{P \tau}{\pi L r_0^2} \quad (2)$$

В силу того, что форма кратера являлась несимметричной, рассчитывалось среднее из различных измерений по координатным осям. Форма кратера не является симметричной, что связано со спецификой работы лазера.

Расчётный диаметр и глубина кратера для алюминия при одноимпульсном возбуждении равнялись:

$d = 380,37$ мкм и $h = 131$ мкм соответственно.

Расчётный диаметр и глубина кратера для меди при возбуждении составили:

$d = 404,12$ мкм и $h = 297$ мкм.

Большой диаметр и глубина кратера медного образца возможно связаны с особенностями структуры и меньшим коэффициентом отражения меди на длине волны 1,06 мкм. Сравнение расчётных и экспериментально полученных данных по диаметру и глубине кратера исследованных образцов алюминия и меди показывает их хорошее соответствие.

Список литературы

1. Атомная спектроскопия. Спектральный анализ / ред. Н. Я. Прохоренко. – Киев : Высш. шк., 2009.
2. Верещагин, М. Н. Структура и свойства латунного сплава системы Cu-Zn-Ni-Fe-Pb-Sn-Al после быстрой закалки из расплава / М. Н. Верещагин, И. В. Агунович. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2017.
3. Куренкова, Т. П. Применение растрового электронного микроскопа, оснащенного системой микроанализа для исследования качества латунного покрытия / Т. П. Куренкова. – Минск : БГУ, 1999.
4. Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 9-й междунар. конф., 20–22 сент. 2011 г., Минск, Беларусь = Interaction of Radiation with Solids : Article of 9th International Conference, September 20–22, 2011, Minsk, Belarus. – Минск, 2011.

Modification of the structure and properties of non-ferrous metals by laser radiation.

Вишневецкий Павел Антонович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, vishnevskypavel98@gmail.com.

Научный руководитель – *Ануфрик Славмир Степанович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, anufrick@grsu.by.

Е. Н. ГАЛЕНКО, С. А. ШАРКО

**ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКИХ СЛОЁВ ЗОЛОТА
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ**

Методом ионно-лучевого напыления получены нанометровые слои золота на кремниевых подложках. Показано, что применение дополнительной операции напыления / распыления с повторным напылением слоя золота позволяет снизить электрическое сопротивление и температурный коэффициент сопротивления.

Золото является востребованным материалом микроэлектроники, что связано с сочетанием таких факторов, как химическая стойкость, высокая электропроводность и отсутствие на поверхности металла естественного слоя оксида [1]. С другой стороны, слои золота толщиной несколько нанометров пропускают более 50 % падающего на них оптического излучения. Указанные свойства определяют перспективность использования наноразмерных слоёв золота в качестве прозрачных электрических контактов, защитных слоёв в мультислойных покрытиях и материалов для лазеров на основе нитрида галлия.

В данной работе исследовались наноразмерные слои золота, полученные на кремнии методом ионно-лучевого напыления [2] с применением дополнительной операции напыления / распыления слоя золота толщиной несколько нанометров. Показано, что применение данной методики заметно улучшает качество получаемых слоёв.

Образцы наноразмерных слоев золота были получены как с применением операции напыления / распыления дополнительного слоя золота, так и без неё.

Перед напылением производилась очистка подложек от посторонних поверхностных примесей в течение 120 с пучком ионов аргона энергией менее 300 эВ и плотностью тока пучка 0,1–0,15 мА/см². Нанесение слоя золота на подложку производилось распылением мишени золота ионами аргона с энергией 1500–1600 эВ и плотностью тока ионов 0,1–0,25 мА/см² в вакууме не хуже 0,2 Па при непрерывном вращении подложки. При использовании дополнительной операции напыления / распыления перед напылением основного слоя на подложку наносился первоначальный слой золота толщиной 2–4 нм в течение 2–3 минут. Распыление этого слоя осуществлялось ионами аргона с энергией менее 300 эВ и плотностью тока 0,1–0,15 мА/см² до исчезновения металлической проводимости.

Было проведено измерение удельного электрического сопротивления и температурного коэффициента сопротивления (ТКС) полученных образцов стандартным линейным четырёхзондовым методом с помощью контактного устройства ИУС-3. Переменный ток I пропусклся через два внешних зонда, а разность потенциалов U измерялась между двумя внутренними зондами. Удельное поверхностное сопротивление слоя металла рассчитывалось по формуле $\rho_s \approx 4,53(U/I)d$, где d – толщина слоя металла [3]. Толщина слоёв определялась на основе экспериментальной зависимости от времени напыления при заданных режимах.

Удельное электрическое сопротивление уменьшается как при увеличении толщины слоёв (рис. 1), так и при использовании дополнительной операции напыления/распыления, которая также снижает ТКС структур, что свидетельствует об улучшении их качества.

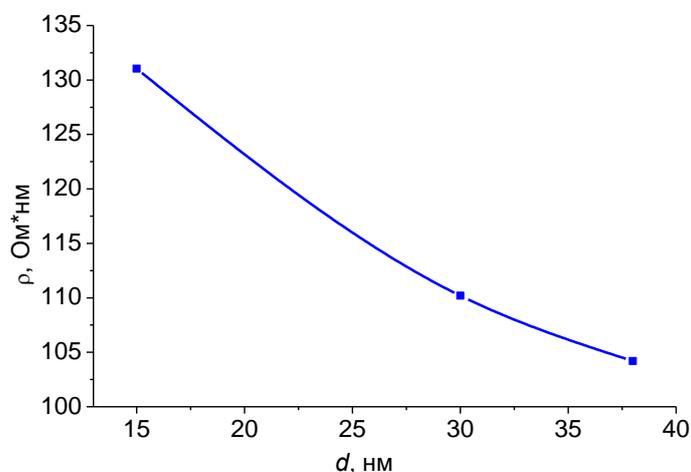


Рисунок 1 – Зависимость удельного сопротивления ρ от толщины d слоя золота

Так, для образцов, полученных с применением дополнительной операции напыления / распыления, значения электрического сопротивления и ТКС составили, соответственно, 110,2 Ом-нм и $5,54 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, а без неё – соответственно 129,8 Ом-нм и $8,93 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Для сравнения можно указать, что удельное сопротивление и ТКС золота в массивном состоянии при комнатной температуре составляет $2,3 \cdot 10^{-8} \text{ Ом-м}$ (23 Ом-нм) и $3,9 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ соответственно.

Для объяснения формирования качественного слоя металла на поверхности подложки при использовании дополнительной операции напыления / распыления наноразмерного слоя золота следует учесть, что в указанных выше условиях ионного распыления на поверхность подложки падает поток распыленных атомов золота. В потоке присутствуют высокоэнергетические атомы с энергией от 35 до 50 эВ, более чем в два раза превышающей энергию связи подавляющего большинства известных оксидных и фторидных материалов, доля которых составляет приблизительно 5 %. Эти частицы способны проникать в подложку на глубину до нескольких постоянных решётки и создавать точечные дефекты.

На основании анализа с помощью программы SRIM, высокоэнергетические атомы с энергией от 35 эВ, способны внедриться в приповерхностный слой подложки кремния на глубину до четырёх постоянных кристаллической решетки и создавать в подложке точечные дефекты. Глубина внедрения дефектов сравнима с толщиной исходного нарушенного поверхностного слоя подложки естественного происхождения. Указанный высокоэнергетический поток в среднем создаёт 0,1 вакансию на ион. Количество внедряемых дефектов менее 10 % от поверхностной плотности материала подложки и не происходит ухудшения исходного качества поверхности подложки и ее основных свойств. Внедренные атомы золота являются, с одной стороны, точечными дефектами в приповерхностном нарушенном слое подложки, а с другой – служат дополнительными центрами кластерообразования. Они приводят к улучшению адгезии из-за формирования дополнительных физических связей «внедренный атом золота – осажденный атом золота». Повторное осаждение слоя золота после распыления в указанных выше условиях позволяет не менее чем в два раза увеличить число внедренных атомов золота, а соответственно, и точечных дефектов, дополнительно усиливающих адгезионную связь. При этом за счёт внедрения атомов золота на глубину до четырёх постоянных решётки в результате применения дополнительной операции напыления / распыления происходит увеличение плотности повторно напыляемого слоя металла вследствие увеличения количества прочных связей «глубоковнедренный атом золота – осажденный атом золота».

Таким образом, метод ионно-лучевого напыления в сочетании с дополнительной операцией напыления / распыления с одновременным вращением подложки позволяет получать наноразмерные слои золота высокого качества. Они обладают меньшим значением удельного сопротивления и ТКС. Улучшение качества слоев металла при использовании дополнительной операции напыления / распыления можно объяснить внедрением в подложку высокоэнергетических ионов золота, которые, с одной стороны, являются источниками точечных дефектов в приповерхностном нарушенном слое подложки; а с другой – служат дополнительными центрами кластерообразования. При этом за счёт внедрения атомов золота на глубину до нескольких постоянных решётки происходит увеличение плотности повторно напыляемого слоя металла.

Список литературы

1. Стогний, А. И. Получение методом ионно-лучевого распыления кислородом и оптические свойства ультратонких пленок золота / А. И. Стогний, Н. Н. Новицкий, С. Д. Тушина, С. В. Калинин // Журнал технической физики. – 2003. – Т. 55, № 6. – С. 86–89.
2. Оптически прозрачная гетероструктура : пат. 2014148518/28 РФ ; МПК H01L 21/3205 (2006.01) B82B 1/00 (2006.01) / А. В. Беспалов, А. И. Стогний, Н. Н. Новицкий, О. Л. Голикова, В. А. Ермаков, В. А. Кецко ; заявл. 03.12.2014 ; опубл. 10.01.2016 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2016.
3. Четырехзондовый метод измерения электрического сопротивления полупроводниковых материалов : учеб.-метод. пособие по спецпрактикуму «Физика полупроводниковых материалов и приборов» для студ. физ. фак. / под ред. Н. А. Поклонского. – Минск : БГУ, 1998. – 46 с.

The nanometer gold layers were obtained on silicon substrates by ion beam deposition. It is shown that the use of an additional deposition / sputtering with deposition of a gold layer allows one to reduce the electrical resistance and temperature coefficient of resistance.

Галенко Евгений. Николаевич, аспирант Мозырского государственного педагогического университета имени И. П. Шамякина, Мозырь, Беларусь.

Шарко Сергей Александрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь.

Научный руководитель – *Стогний Александр Иванович*, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь, stognij@physics.by.

А. Н. ГЕТАЛО, В. А. МИКИТЕНКО, Г. М. КУЗЬМЕНКО, А. М. ХЛОПОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФТОРЗАМЕЩЁННОГО ГЕПТИЛОВОГО СПИРТА

На основе экспериментальных данных о температурных зависимостях показателя преломления и плотности гептанола-1 и 1Н,1Н,7Н-додекафторгептанола-1 исследовано влияние замещения атомов водорода атомами фтора в молекуле одноатомного спирта на оптические свойства и строение молекулы фторзамещенного спирта.

Фторзамещенные соединения находят широкое применение в промышленности, сельском хозяйстве, медицине, технике и продолжают внедряться в новые сферы производства. Поэтому детальное изучение физических свойств фторзамещенных веществ определяет практическую ценность и новые сферы использования данных соединений [1]. Цель настоящей работы заключается в определении влияния замещения в молекуле нормального алифатического спирта боковых атомов водорода более массивными атомами фтора на оптические свойства фторзамещенной молекулярной жидкости.

Объектами исследования являются гептанол-1 ($C_7H_{15}OH$) и его фторпроизводный аналог – 1Н,1Н,7Н-додекафторгептанол-1 ($H(CF_2)_6CH_2OH$), некоторые сведения о котором можно найти в работе [2], однако физико-химические свойства данного соединения остаются малоизученными. Измерения показателя преломления и плотности жидкостей проводились в интервале температур 303–333 К. Плотность (ρ) определяли пикнометрическим методом с суммарной погрешностью 0,05 %; показатель преломления (n_D) измеряли рефрактометром ИРФ-454Б с погрешностью $2 \cdot 10^{-4}$ согласно методике, изложенной в работе [3]. Значения температурных зависимостей экспериментальных величин (ρ и n_D) представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Температурные зависимости плотности и показателя преломления гептанола-1 и 1Н,1Н,7Н-додекафторгептанола-1

T, К	Гептанол-1 ($C_7H_{15}OH$)		Додекафторгептанол-1 ($C_7H_3F_{12}OH$)	
	$\rho, \text{кг} / \text{м}^3$	n_D	$\rho, \text{кг} / \text{м}^3$	n_D
283	830,1	1,4263	1781,3	1,3216
293	821,9	1,4232	1761,6	1,3183
303	813,7	1,4221	1743,4	1,3150
313	805,5	1,4171	1725,2	1,3118
323	797,2	1,4132	1706,1	1,3086
333	789,0	1,4119	1687,1	1,3053

Анализ экспериментальных данных позволяет сделать выводы, что с заменой двенадцати атомов водорода на атомы фтора в молекуле гептанола-1 наблюдается повышение плотности на 114,3 % и уменьшение показателя преломления на 8 %. Температурные зависимости $\rho = \rho(T)$ и $n_D = n_D(T)$ носят линейный характер и с ростом температуры монотонно убывают.

Далее для сравнения молекулярного строения гептанола-1 и его фторзамещенного аналога мы обратились к мольной рефракции. Относительно мольной рефракции можно сказать, что это величина обладает свойствами аддитивности, а потому может быть рассчитана добавлением рефракционных констант, исходя из строения молекулы. Расчет прогнозируемой аддитивной рефракции проводят по атомным рефракциям, рефракциям связей, групповым рефракциям, структурным инкрементам, используя таблицы Фогеля [3]. Мольную рефракцию рассчитывали на основе экспериментальных данных, используя формулу Лорентц-Лоренца:

$$R_D = \frac{n_D^2 - 1}{n_D^2 + 2} \frac{M}{\rho}, \quad (1)$$

где n – показатель преломления, M – молярная масса, ρ – плотность. Различие между значениями рассчитанной экспериментально по формуле (1) и аддитивной величинами мольной рефракции называется экзальтацией мольной рефракции. Причинами экзальтации, кроме погрешностей измерения и усредненности аддитивных констант, являются кратные связи, разветвления скелета, пространственные конформации молекул. С увеличением молекулярной массы и длины молекул вещества величина экзальтации может принимать большие значения.

Экспериментальные молярные рефракции гептанола и додекафторгептанола, рассчитанные по формуле (1), отличаются незначительно, что свидетельствует о сходстве структур этих спиртов [4]. Для гептилового спирта значение экспериментальной и расчетной молярной рефракции совпадают в пределах погрешности эксперимента, в то время как для додекафторгептанола экспериментальное значение значительно отличается от рассчитанных значений по таблицам Фогеля [3]. Это свидетельствует о наличии особенностей структуры, вызывающих экзальтацию молекулярной рефракции. Ссылаясь на исследование [1], можно предположить наличие стерического эффекта галогена-заместителя в молекуле додекафторгептанола, что вызывает отталкивание между соседними атомами фтора. Как правило, проявлением стерического эффекта является изменение длины связей и валентного угла между углеводородным скелетом и галогеном, что вызывает напряжение внутримолекулярной структуры и ее изменение. Мы считаем, что вследствие этого зигзагоподобная структура молекулы алифатического спирта изменяется в пользу спирального размещения атомов фтора в молекуле фторзамещенного спирта [5]. Подобную картину мы наблюдали для молекулы фторзамещенного пропилового спирта в работе [6] (рис. 1).

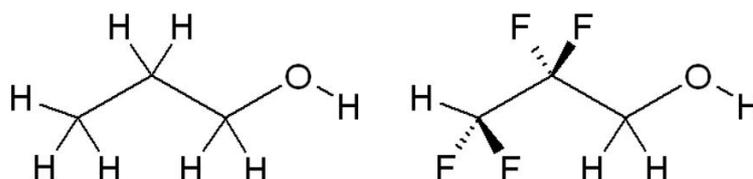


Рисунок 1 – Схематическая структура молекулы пропанола-1 (слева) и молекулы 2,2,3,3-тетрафторпропанола-1 (справа) [6]

Таким образом, на основе экспериментальных данных о температурных зависимостях показателя преломления и плотности гептанола-1 и 1Н,1Н,7Н-додекафторгептанола-1 исследовано влияние замещения атомов водорода атомами фтора в молекуле одноатомного спирта на оптические свойства и строение молекулы фторзамещенного спирта. С заменой двенадцати атомов водорода на атомы фтора в молекуле гептанола-1 наблюдается повышение плотности и уменьшение показателя преломления. Высока вероятность изменения структуры молекулы 1Н,1Н,7Н-додекафторгептанола-1 по сравнению со строением молекулы гептанола-1: зигзагоподобная структура молекулы алифатического спирта изменяется в пользу спирального размещения атомов фтора в молекуле фторзамещенного спирта.

Список литературы

1. Kirsch, P. *Modern Fluoroorganic Chemistry: Synthesis, Reactivity, Applications* / P. Kirsch. – Germany : Wiley, 2004. – 320 p.
2. Максимов, Б. Н. *Промышленные фторорганические продукты : справочник* / Б. Н. Максимов. – Л. : Химия, 1990. – 462 с.
3. Иоффе, Б. В. *Рефрактометрические методы химии* / Б. В. Иоффе. – Л. : Химия, 1983. – 352 с.
4. Булавін, Л. А. Вплив фторування нормальних аліфатичних спиртів на їх фізичні властивості / Л. А. Булавін, А. М. Гетало, О. П. Руденко, О. В. Хорольський // *Український фізичний журнал*. – 2015. – Т. 60, № 5. – С. 429–433.
5. Гетало, А. Н. Реологические, оптические и диэлектрические свойства 1Н,1Н,7Н-додекафторгептанола-1 и гептанола-1 / А. Н. Гетало, А. В. Хорольский, А. М. Займак, С. А. Стеценко // *Вестн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальна тэхніка і кіраванне*. – 2015. – № 1 (186). – С. 89–94.
6. Руденко, О. П. Реологічні та оптичні властивості 2,2,3,3-тетрафторпропанолу-1 / О. П. Руденко, О. В. Хорольський, А. М. Гетало, О. В. Саєнко // *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. – 2010. – № 1. – С. 223–226. – (Серія: фізико-математичні науки).

Based on experimental data about temperature dependencies of density and index of refraction of 1-heptanol and 1Н,1Н,7Н-dodecafluoro-1-heptanol, the influence of the substitution of the hydrogen atoms by the fluorine atoms in the 1-heptanol molecule on optical properties and the structure of the fluorinated alcohol molecule was investigated.

Гетало Андрей Николаевич, аспирант Полтавского национального педагогического университета имени В. Г. Короленко, Полтава, Украина, npnu20@gmail.com.

Микитенко Валерий Александрович, студент физико-математического факультета Полтавского национального педагогического университета имени В. Г. Короленко, Полтава, Украина, npnu20@gmail.com.

Кузьменко Григорий Михайлович, кандидат педагогических наук, доцент, Полтавский национальный педагогический университет имени В. Г. Короленко, Полтава, Украина, npnu20@gmail.com.

Научный руководитель – *Хлопов Андрей Михайлович*, кандидат физико-математических наук, доцент, Полтавский национальный педагогический университет имени В. Г. Короленко, Полтава, Украина, hyperpotential@gmail.com.

И. К. ГУБАРЕВИЧ

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА, ПОДВЕРГШЕГОСЯ ЛАЗЕРНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

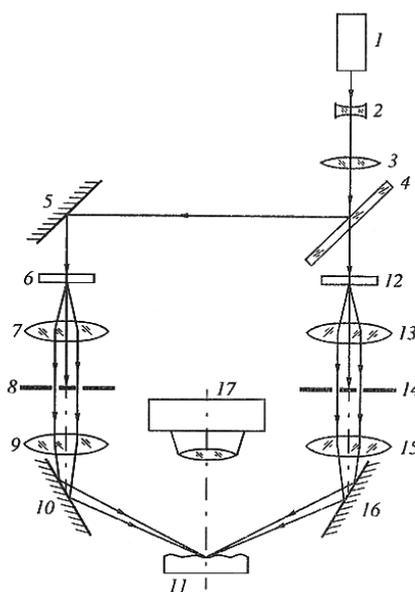
Показана возможность применения высокочувствительных оптических методов исследования топографии поверхности металлов при их лазерной обработке для учета влияния различных внешних факторов на формирование рельефа мишени.

При выборе наиболее эффективных режимов лазерной обработки материалов, включая лазерный раскрой, перфорацию, сварку материалов, модификацию свойств их поверхности, лазерное напыление пленок, а также для разработки новых методов контроля лазерных технологических процессов необходимы исследования процессов, происходящих как в течение времени лазерного воздействия на материал, так и протекающих после прекращения внешних воздействий.

Процессы, происходящие во время воздействия на объект лазерного импульса длительностью порядка 1 мс и сразу после него, описаны в [1; 2]. Схема использованной в работе экспериментальной установки приведена в [1]. Для экспериментов использовалось излучение рубинового лазера ГОР-100М ($\lambda = 0,694$ мкм), работавшего в режиме свободной генерации (длительность импульса $\tau \sim 1,2$ мс). Энергия лазерных импульсов E_0 варьировалась в пределах от 5 до 60 Дж.

Для исследования формы поверхности образовавшегося на пластине кратера, использовался метод проекции полос, который в данном случае оказался более эффективным по сравнению с голографическими методами получения контуров рельефа, и стереофотограмметрическим методом, так как позволял ещё на стадии проецирования полос, получить картину с регулируемой чувствительностью измерений и достаточно хорошей видимостью полос, контролируемых визуально. Регулирование чувствительности измерений (относительное смещение полосы) достигалось изменением периода спроецированных полос, а хорошая видимость обеспечивалась изменением угла освещения исследуемой поверхности до устранения световых бликов от поверхности кратера. Данный метод детально описан в работе [4].

Для изучения изменения рельефа поверхности мишени вне зоны кратера, (на нее падают капли расплавленного металла, также возможно влияние плазменного факела) чувствительности данного метода не хватает. Поэтому был предложен следующий метод исследования, схема которого показана на рис. 1.



1 – лазерный источник света, 2, 3 – телескопическая система, 4 – светоделитель, 5, 10, 16 – зеркала, 6, 12 – пропускающие дифракционные решетки, 7, 9, 13, 15 – объективы, 8, 14 – фильтрующие диафрагмы, 11 – исследуемая поверхность образца, 17 – фотоаппарат

Рисунок 1 – Оптическая схема исследования рельефа поверхности образца в реальном времени

При использовании голографического метода наблюдение муаровой картины производится в реальном времени. Использование данной методики позволяет регулировать чувствительность измерений, что видно на рис. 2. Это происходит путем изменения периода полос проецируемой картины, а также изменением угла между направлением проецирования картины и нормалью к исследуемой поверхности.

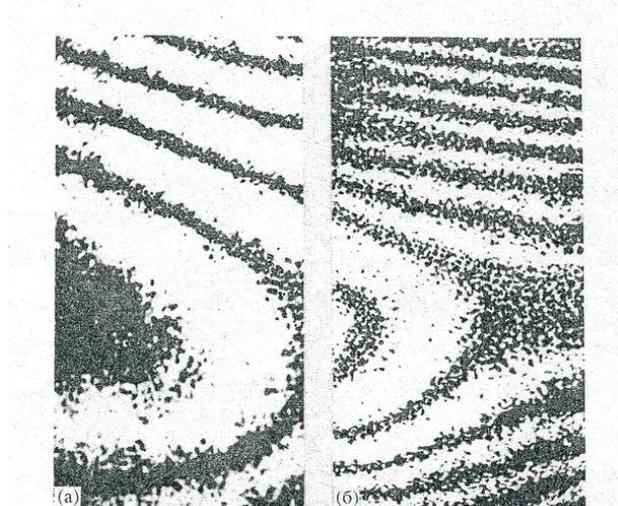


Рисунок 2 – Муаровые картины рельефа поверхности образца в реальном времени с различными расстояниями между соседними контурами: а) 110, б) 55 мкм

Таким образом, с помощью предложенных методик была исследована как зона лазерного разрушения, так и зона, не подвергающаяся непосредственному лазерному воздействию.

Список литературы

1. Васильев, С. В. Влияние электрического поля на приповерхностные процессы при лазерной обработке материалов / С. В. Васильев, А. Ю. Иванов // Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42, № 2. – С. 170–174.
2. Влияние давления фонового газа на качество лазерной обработки металлов / С. В. Васильев [и др.] // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2019. – Т. 9, № 1. – С. 89–100.
3. Губаревич, И. К. Визуализация формы поверхности в реальном времени с регулированием чувствительности измерений / И. К. Губаревич, А. М. Ляликов // Визуализация формы поверхности в реальном времени с регулированием чувствительности измерения. // Оптика и спектроскопия. – 1996. – Т. 80, № 6. – С. 948–952.
4. Васильев, С. В. Оптическая визуализация топографии кратера, образующегося при действии лазерного импульса на твердый образец / С. В. Васильев, А. Ю. Иванов, А. М. Ляликов // Квантовая электроника. – 1993. – Т. 20, № 6 – С. 616–618.

Various aspects of the effect by laser radiation on metal surfaces are investigated. The surface topography is visualized by using highly sensitive methods. The measurement sensitivity can be adjusted.

Губаревич Игорь Константинович, аспирант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, i.gubarevich@grsu.by.

Научный руководитель – *Васильев Сергей Валерьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, s.vasilijev@grsu.by.

УДК 535.34

И. Г. ДАДЕНКОВ

ИМПУЛЬСНАЯ ЗАПИСЬ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕШЁТОК В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ КРИСТАЛЛАХ СИЛИКАТА ВИСМУТА

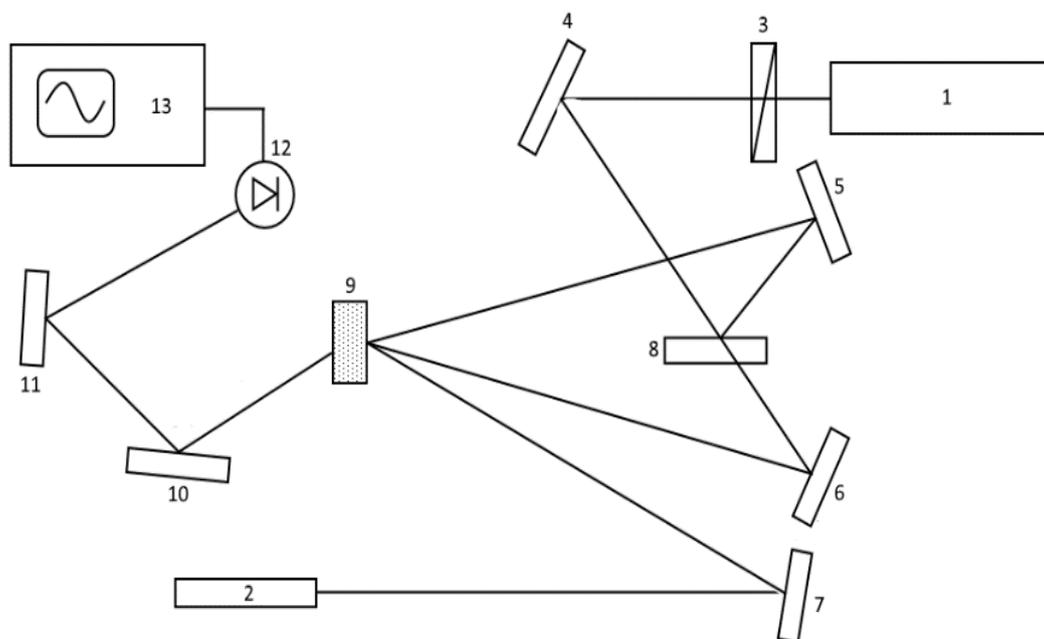
Проанализированы схемы импульсной записи динамических голограмм в фоторефрактивных кристаллах силиката висмута. Были обнаружены два механизма формирования нестационарных решеток с временами жизни, отличающимися на

несколько порядков. Показано, что проявление этих механизмов существенно зависит от интенсивности излучения, формирующего голограмму.

Одним из существенных преимуществ кубических фоторефрактивных кристаллов семейства силленитов ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$) является формирование в них динамических голограмм в реальном масштабе времени. Это определяет их использование в адаптивных интерферометрах, оптических датчиках ассоциативных устройств, цифровой микроскопии, для оптической записи, хранения и обработки информации, усиления оптических изображений и др. Физические процессы записи голограмм в указанных средах основаны на перераспределении зарядов в кристаллах под действием света по многочисленным дефектным центрам, имеющим разнообразную природу возникновения и характеристики. При этом фоторефрактивные кристаллы позволяют работать как с непрерывным, так и с импульсным (нано- и пикосекундным) лазерным излучением.

В настоящем докладе приведен обзор результатов исследования процессов формирования и релаксации коротко- и долгоживущих голографических решеток в фоторефрактивных кристаллах семейства силленитов со сложной структурой дефектных центров в условиях импульсного возбуждения.

Запись динамических решеток осуществлялась импульсами второй гармоники излучения лазера на иттрий-алюминиевом гранате (длина волны 532 нм) с длительностью импульса 20 нс. Система зеркал с диэлектрическим напылением формировала близкие по интенсивности сигнальные и опорные волны, которые записывали решетку в кристалле силиката висмута. Считывание дифракционной решетки проводилось непрерывным излучением гелий-неонового лазера (длина волны 632,8 нм), которое направлялось на кристалл под углом Брегга. Система регистрации на основе ФЭУ с временным разрешением 20 мкс и цифрового осциллографа позволяла отслеживать изменения интенсивности дифрагированного пучка и, следовательно, процессы релаксации динамической решетки.



1 – Nd:YAG-лазер; 2 – гелий-неоновый лазер; 3 – полуволновая пластинка, 4–8, 10, 11 – зеркала, 9 – кристалл силиката висмута; 12 – скоростное фотоприёмное устройство; 13 – электронный осциллограф

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Типичные осциллограммы дифрагированного излучения гелий-неонового лазера представлены на рис. 2 и рис. 3. Видно, что динамика релаксации дифракционной картины существенно зависит от интенсивности формирующего голограмму излучения, к тому же стоит отметить проявление двух механизмов формирования решеток, вклад которых в дифракционную эффективность, опять же, зависит от интенсивности.

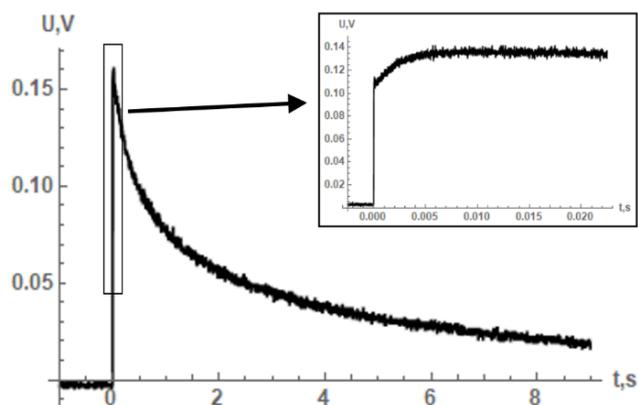


Рисунок 2 – Характерная осциллограмма релаксации дифракционной решетки при интенсивности 3 MW/cm^2

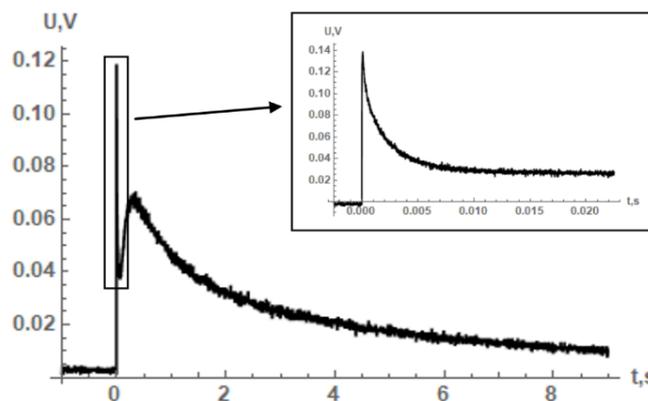


Рисунок 3 – Характерная осциллограмма релаксации дифракционной решетки при интенсивности 15 MW/cm^2

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволили определить основные закономерности импульсной записи динамических голограмм в фоторефрактивных кристаллах силиката висмута. Выделены два механизма записи динамических решеток. Заселение короткоживущих ловушечных уровней, характеризующимися временем релаксации дифракционной решетки на уровне миллисекунд и заселение долгоживущих ловушечных уровней с временами релаксации порядка нескольких секунд. Есть основания полагать, что данные механизмы проявляют себя во всем диапазоне исследуемых интенсивностей, но разрешить их по времени представляется возможным только после значения интенсивности в 5 MW/cm^2 .

Список литературы

1. Hermann, J. P. Nanosecond four-wave mixing and holography in BSO crystals / J. P. Hermann, J. P. Herriau, J. P. Huignard // Applied Optics. – 1981. – Vol. 20. – P. 2173–2174.
2. Jones, D. C. Competition between subharmonic and signal beams for photorefractive gain in BSO with two pump beams / D. C. Jones, S. F. Lyuksyutov, L. Solymar // Applied Physics B. – 1991. – Vol. 52. – P. 173–175.
3. Murillo, J. G. Photorefractive grating dynamics in $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ using optical pulses / J. G. Murillo // Optics Communications. – 1999. – Vol. 159. – P. 293–300.
4. Петров, М. П. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике / М. П. Петров, С. И. Степанов, А. В. Хоменко. – СПб. : Наука. С.-Петербург. отд., 1992. – 320 с.
5. Шепелевич, В. В. Голография в фоторефрактивных оптически активных кристаллах : моногр. / В. В. Шепелевич. – Мозырь : МГПУ им. И. П. Шамякина, 2012. – 287 с.

6. Ханон, Х. К. Спектральные особенности фотохромного эффекта в кристаллах титаната висмута при импульсном возбуждении / Х. К. Ханон, А. В. Станкевич, А. Л. Толстик // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2012. – № 3. – С. 3–6.

7. Ханон, Х. К. Динамика фотоиндуцированного поглощения в кристаллах титаната висмута / Х. К. Ханон, А. Л. Толстик // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2012. – № 2. – С. 3–7.

8. Динамические голограммы Денисюка в кубических фоторефрактивных кристаллах / С. М. Шандаров [и др.] // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38, № 11. – С. 1059–1069.

Pulse recording schemes of dynamic holograms in photorefractive bismuth silicate crystals are analyzed. Discovered two mechanisms for the formation of unsteady lattices with lifetimes differing by several orders of magnitude. It is indicated that the manifestation of these mechanisms substantially depends on the intensity of the radiation forming the hologram.

Даденков Иван Геннадьевич, физический факультет, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь; fiz.dadenkov@bsu.by.

Научный руководитель – *Толстик Алексей Леонидович*, доктор физико-математических наук, профессор, физический факультет, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, Tolstik@bsu.by.

УДК 539.21

А. ЕВДОКИМОВС

МОДИФИКАЦИЯ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНОВОГО СПЛАВА Al–20Si КОМПРЕССИОННЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ

В исследовании будут рассматриваться структура и изменение поверхностного слоя заэвтектического силумина после воздействия компрессионными плазменными потоками.

Силумины – это сплавы на основе алюминия с кремнием, которые широко используются в авиа- и машиностроении, чаще всего в литом виде. Разделяют силумины на доэвтектические (<10 ат. % Si), эвтектические (10–12 ат. % Si) и заэвтектические (>12 ат. % Si) [1]. Из преимуществ силуминов можно выделить невысокую стоимость, износостойкость и относительно малый вес. К недостаткам можно отнести пористость данного сплава после отливки вследствие ликвации кремния.

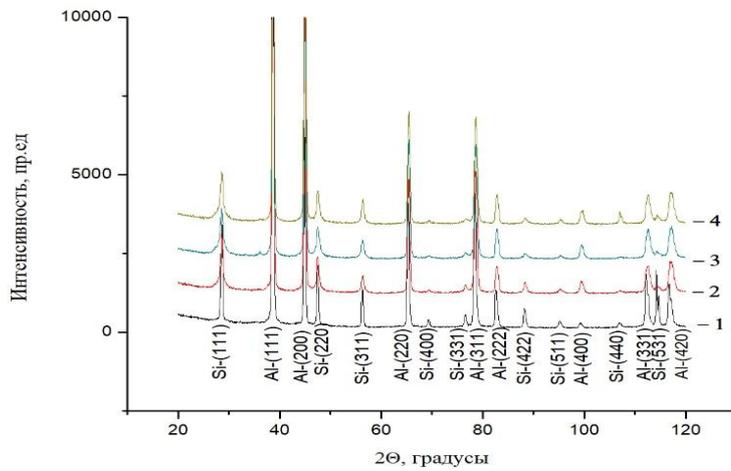
Целью данной работы является изучение структурных изменений в заэвтектическом силумине с содержанием кремния 20 ат. % после обработки компрессионными плазменными потоками.

В данной работе использовались образцы силуминов размером 10×10 мм и толщиной 2 мм. Данный сплав обрабатывался при помощи компрессионного плазменного потока на различных расстояниях от катода: 6, 10 и 14 см. Таким образом изменялась плотность энергии, поглощенной образцом. Плазма создавалась в остаточной атмосфере азота с давлением в 10 тор. Напряжение на конденсаторе составляло 4,0 кВ.

С помощью дифрактометра Rigaku Ultima IV в медном излучении проводился рентгеноструктурный анализ образцов до и после облучения КПП. Толщина и структура модифицированного слоя изучалась с помощью оптического микроскопа при различных увеличениях.

На рис.1 представлена совокупность дифрактограмм исходного и облученных образцов силуминов. Совокупность дифракционных максимумов соответствует фазам алюминия и кремния. Можно увидеть, что после воздействия КПП новых фаз не появилось. По угловым положениям дифракционных максимумов были рассчитаны постоянные решетки для алюминия и кремния. Исходный параметр решетки составил для кремния 0,542 нм и для алюминия 0,404 нм. Для обработанных образцов постоянная решетки составляет 0,542 нм и 0,404 нм. Отсутствие изменений постоянной решетки говорит о том, что при обработке не произошло деформации кристаллической решетки, а также взаимного растворения компонентов сплава.

С помощью оптического микроскопа была установлена толщина модифицированного слоя. На рис. 2 представлены оптические изображения поперечных шлифов сплавов, на которых можно заметить модифицированный слой образцов, обработанных при различных расстояниях. Толщина модифицированного слоя на расстоянии 6 см от катода составляет около 25–30 мкм, 10 см – около 50 мкм, 14 см – около 20 мкм. В модифицированном слое происходит гомогенизация элементного состава в приповерхностном слое образцов. В результате обработки в модифицированном слое происходит формирование эвтектической смеси с дисперсной структурой [2].



1 – исходное состояние, 2 – 6 см от катода, 3 – 10 см от катода, 4 – 14 см от катода

Рисунок 1 – Дифрактограммы обработанных КПП образцов силуминовых плавов

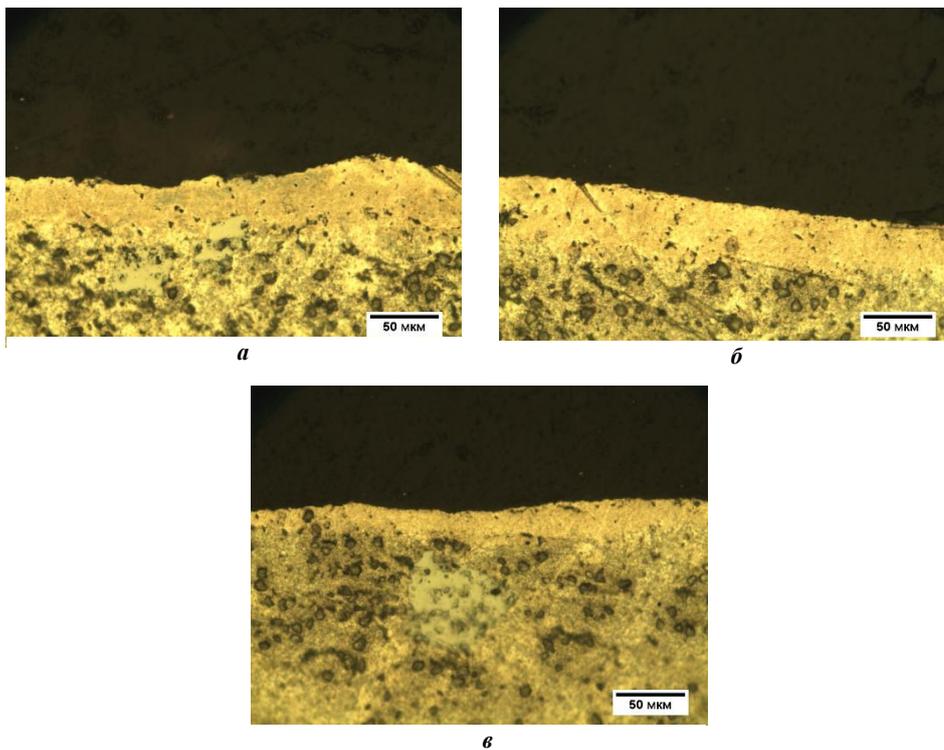


Рисунок 2 – Изображение участка модифицированного слоя, полученного при помощи оптического микроскопа: а) 6 см от катода б) 10 см от катода в) 14 см от катода

В данной работе был изучен заэвтектический сплав алюминия и кремния до и после воздействия компрессионными плазменными потоками на различных расстояниях от катода. При помощи рентгеноструктурного анализа были посчитаны постоянные кристаллической решётки алюминия и кремния. При помощи оптического микроскопа был исследован приповерхностный модифицированный слой и определена его толщина. Установлено, что толщина модифицированного слоя зависит от поглощённой образцом энергии.

Список литературы

1. Белов, Н. А. Фазовый состав и структура силуминов / Н. А. Белов, С. В. Савченко, А. В. Хван. – М. : МИСИС, 2007. – С. 9–13.
2. Модифицирование поверхностного слоя эвтектического силумина компрессионными плазменными потоками / Н. Н. Черенда [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2012. – № 3. – С. 37–42.

In this work, we will consider the effect of compression plasma flow on the surface and structure of the Al-Si alloy with high Si content.

Евдокимовс Антонс, студент 4-го курса физического факультета (кафедра твёрдого тела) Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, jevdokimovanton@gmail.com.

Научный руководитель – *Шиманский Виталий Игоревич*, кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

УДК 539.21

Д. В. ЕСИПЕНКО, М. С. ГУРКИНОВ

ВЛИЯНИЕ ХРОМА НА КИНЕТИКУ ОКИСЛЕНИЯ ТИТАНА

В работе было исследовано влияние хрома на термическую стойкость титана при изотермическом отжиге.

В настоящее время использование титана и его сплавов во многих отраслях промышленности обусловлено тем, что его прочность примерно равна прочности стали при том, что он на 45 % легче. Титан на 60 % тяжелее алюминия, но прочнее его примерно вдвое. Титановые сплавы являются важнейшими конструкционными материалами в авиа- и ракетостроении, в кораблестроении, а также в атомной энергетике, где применяется для изготовления лопаток турбин. Большой интерес вызывает изучение структурных и фазовых превращений в титане при окислении в случае его нагрева до 600 °С, так как именно при данной температуре происходит эксплуатация лопаток турбин, в результате чего на их поверхности происходит рост оксидной пленки. При более высокой температуре одновременно с увеличением скорости окисления наблюдается растворение кислорода, что сильно понижает пластичность титана. В данной работе рассматривается влияние легирующего элемента (хрома) на окисление титана.

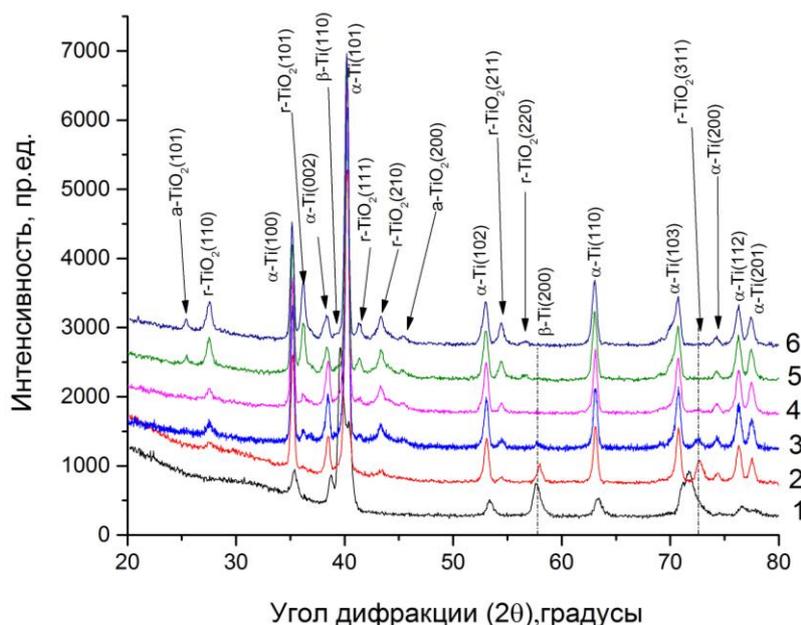
Объектами исследования являлись образцы технически чистого титана марки ВТ1-0 в форме пластинок 1×1 см и толщиной 3 мм. На поверхность пластин наносилось покрытие хрома толщиной около 1 мкм, после чего образцы подвергались обработке импульсными (длительность импульса 100 мкс) высокоинтенсивными электронными пучками. Электронные пучки оказывают преимущественно тепловое воздействие, что приводит к плавлению поверхностного слоя и последующему затвердеванию, что способствует жидкофазному перемешиванию легирующих элементов в поверхностном слое [1]. Впоследствии образцы подвергались изотермическому отжигу в печи при температуре 600 °С в атмосфере воздуха, скорость нагрева 2 град./мин. время отжига достигало 7-ми часов, охлаждение производилось в печи. Фазовый состав образца изучался на основе рентгеноструктурного анализа (РСА) на дифрактометре Rigaku Ultima IV в геометрии параллельных пучков с использованием медного излучения ($\lambda = 0,154178$ нм).

В результате изотермического отжига в атмосфере воздуха происходит насыщение поверхностного слоя образца атомами кислорода, приводящее к изменению фазового состава. Проникновение кислорода в поверхностный слой происходит по диффузионному механизму под действием градиента концентрации. На начальном этапе насыщения кислородом, атомы проникают в кристаллическую решетку α -Ti, образуя твердый раствор α -Ti(O) с гексагональной решеткой, формирующийся по типу внедрения. Дальнейшее насыщение приповерхностного слоя титана атомами кислорода, приводящее к увеличению его концентрации, способствует трансформации твердого раствора в оксидную фазу. В поверхностном слое происходит формирование оксида модификации рутил TiO₂. Модификация рутил обладает тетрагональной кристаллической структурой. Данная модификация является стабильной, в связи с чем, образование оксида модификации рутила становится наиболее выгодным.

В ходе рентгеноструктурного исследования сформированного образца, была обнаружена высокотемпературная фаза титана β -Ti. Хром растворяясь в поверхностном слое титана образует твердый раствор на основе высокотемпературной β -фазы титана с ОЦК решеткой.

В результате изотермического отжига в атмосфере воздуха происходит насыщение поверхностного слоя образца кислородом, приводящее к изменению фазового состава. Проникновение кислорода в поверхностный слой происходит по диффузионному механизму под действием градиента концентрации. На начальном этапе

насыщения образуется твердый раствор α -Ti(O) с гексагональной решеткой. Дальнейшее насыщение поверхностного слоя кислородом приводит к образованию устойчивой фазы TiO₂ рутил (γ -TiO₂). Дифракционные линии данной фазы обнаруживаются после первого часа изотермического отжига (рисунок 1). После отжига в течении 7 часов на рентгенограмме обнаружены дифракционные линии при угле дифракции $2\theta = 25,30^\circ$ и $2\theta = 45,30^\circ$, которые могут быть отнесены к отражениям от кристаллографических плоскостей высокотемпературной фазы оксида титана анатаза (α -TiO₂). Дифракционная линия при угле дифракции $2\theta = 25,30^\circ$ начинает появляться после 5-ти часов отжига, а линия при угле дифракции $2\theta = 45,30^\circ$ начинает появляться после 2-х часов отжига. В данном образце можно предположить, что раннее формирование анатаза (5 часов) связано с присутствием хрома. Фаза оксида титана анатаз имеет тетрагональную решетку и является неустойчивой.



1 – исходное состояние, 2 – 1 час, 3 – 2 часа, 4 – 3 часа, 5 – 5 часов, 6 – 7 часов

Рисунок 1 – Рентгенограммы образцов сплава Ti-Cr после отжига на воздухе при температуре 600 °C при различных временах

С увеличением времени изотермического отжига происходит трансформация кристаллической решетки β -фазы титана. Параметр решетки β -фазы изменяется с 0,4552 нм до 0,3180 нм. После отжига в течении трех часов происходит распад β -фазы титана. Вследствие диффузии атомов легирующего элемента вглубь образца.

С помощью рентгеноструктурного анализа, было установлено, что после распада β -фазы, скорость насыщения кислородом образца повышается.

В ходе проведенных исследований было установлено что, при добавлении в поверхностный слой хрома происходит образование β -фазы и образование оксидной фазы титана TiO₂ модификации рутил, но после 3 часов отжига β -фаза распадается, что способствует быстрейшему насыщению сплава атомами кислорода и росту оксидной фазы титана.

Список литературы

1. Модификация титана при воздействии компрессионными плазменными потоками / В. М. Асташинский [и др.]. – Минск : Бел. наука, 2016. – 179 с.

In this work, we studied the effect of chromium on the thermal stability of titanium during isothermal annealing.

Есипенко Денис Викторович, студент 6 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, ya.alukard2014@yandex.by.

Гуркинов Михаил Сергеевич, студент 6 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, misha.gurk@mail.ru

Научный руководитель – Шиманский Виталий Игоревич, кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

М. А. ЖЕРНАК, Н. Н. КУРЬЯН

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ АНАЛИЗИРУЕМЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Цель работы – улучшения чувствительности обнаружения химических элементов методом лазерно-эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС), по средствам применения наночастиц серебра. Выполнен обзор литературы по применению наночастиц в целях улучшения чувствительность обнаружения ЛИЭС. Определены опытным путем оптимальная концентрация и размер наночастиц серебра, приводящих к увеличению интенсивности спектральных линий компонентов сплава латуни.

Локализованный поверхностный плазмонный резонанс (ЛППР) может сильно усиливать электромагнитное поле вблизи поверхности металла, а также могут приводить к резкому увеличению коэффициента поглощения [1]. Кроме того, ЛППР может зависеть от формы и размера, формируемых нанокластеров. Усиление электрического поля и пик поглощения могут быть зависеть так же от толщины наноструктурированного покрытия [2].

Использование локальных поверхностных плазмонов (ЛПП) в методе Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) может значительно повысить интенсивность излучения плазмы, поэтому наноструктуры металлов в настоящее время применяются для улучшения чувствительности обнаружения LIBS. Усиление сигнала LIBS в большинстве публикаций [3–8] наблюдалось при использовании наночастиц золота или серебра. Авторами [9] достигнуто увеличение спектральной интенсивности в 3–5 раз. Изучено влияние концентрации и размеров коллоидных растворов наночастиц на спектральную интенсивность линий излучения серебра.

Авторы работы [9] получили увеличение спектральной интенсивности в 3–5 раз и обнаружили, что интенсивности излучения зависит как от концентрации, так и от размеров коллоидных наночастиц серебра. В работе [10] наночастицы Ag были нанесены на металлические подложки, и было отмечено усиление сигнала примерно на два порядка. Ими так же было показано, что на интенсивность излучения исследуемого элемента практически не влияли размеры наночастиц Ag с диаметрами в диапазоне 10–20 нм. Авторами [11] установлено, что существует критическая концентрация и размеры наночастиц, при которой наблюдается явный рост усиления. Данные исследования позволяют изменять концентрацию наночастиц, сохраняя фиксированный диаметр наночастиц методом осаждения наночастиц в виде сушки капли коллоида на поверхности образца.

Анализ вышеизложенных литературных источников указывает о противоречивости полученных результатов исследований, поскольку достоверно не установлено влияние концентрации наночастиц на интенсивность излучения плазмы.

В качестве объекта исследования использовался образец латунного сплава марки С 86400 следующего состава: Cu – 55,994 %; Zn – 41,523 %; Ni – 1,960 %; V – 0,289 %; Fe – 0,234 %. Перед проведением исследований, поверхность образца тщательно шлифовывалась шлифовальными шкурками с различным размером частиц абразивного вещества. После чего проводилась полировка поверхности сплава войлочным кругом до зеркального состояния.

Получение наночастиц (НЧ) серебра методом лазерной абляции в жидкости производилось с использованием Nd:YAG³⁺-лазера LS-2147 ($\lambda = 532$ нм). Наночастицы получались путем воздействия, в течении 5 мин, лазерным излучением с энергией 170 мДж и частотой 10 Гц по слитку серебра, помещенного в дистиллированную воду.

Изучение морфологии поверхности и оценка размеров НЧ осуществлялось с использованием ACM NT-206 в статическом режиме сканирования кремниевым кантилевером СЗС 38 и динамическом режиме NSC 11. На рисунке 1а представлено объемное изображение наноструктур серебра в центре подложки. Для оценки концентрации полученных наночастиц измерялся спектр поглощения на спектрофотометре Specord 200. Измеренный спектр раствора наночастиц серебра представлен на рисунке 1б.

Оценка размеров отдельных наночастиц показывает, что их минимальный размер составляет порядка 28–42 нм, что хорошо согласуется с работой [9]. Из рисунка 1б видно, что максимум оптической плотности раствора приходится на 405 нм. Оптическая плотность раствора наночастиц 0,35D соответствует концентрации $\sim 3,5 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³.

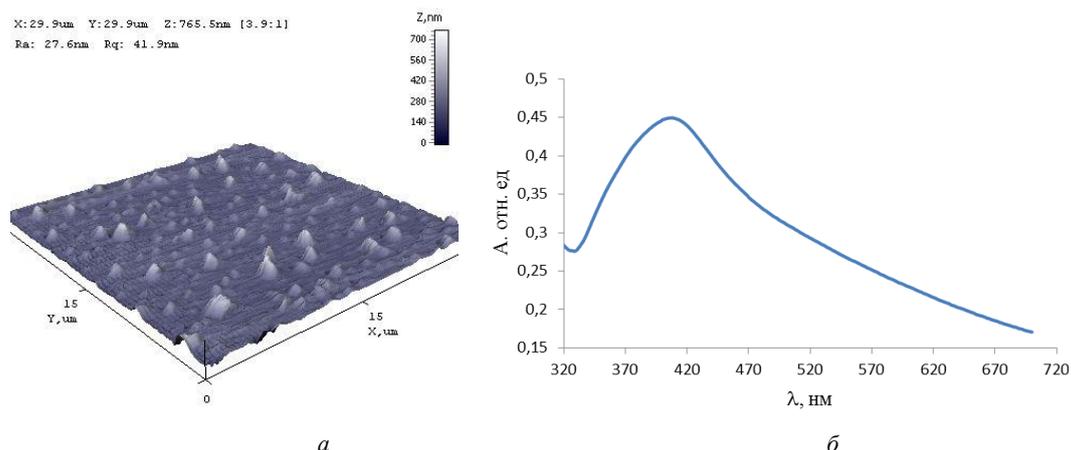


Рисунок 1 – а) объёмное изображение наноструктуры серебра в центре подложки, б) спектр поглощения раствора наночастиц серебра

Полученные НЧ наносились на ранее подготовленную поверхность латунного сплава. Концентрация НЧ на поверхности образца увеличивалась за счет нанесения дополнительной капли НЧ (≈ 50 мкл) после высыхания ранее нанесенного раствора НЧ. Поскольку увеличение концентрации наночастиц для покрытия, осажденного из трех капель, сопровождается, как увеличением количества отдельных наночастиц, так и появлением их агломераций, то в дальнейшем количество капель, нанесенных на поверхность исследуемого материала, не увеличивалась. Изображения наноструктур серебра на поверхности латунного сплава представлены на рисунке 2.

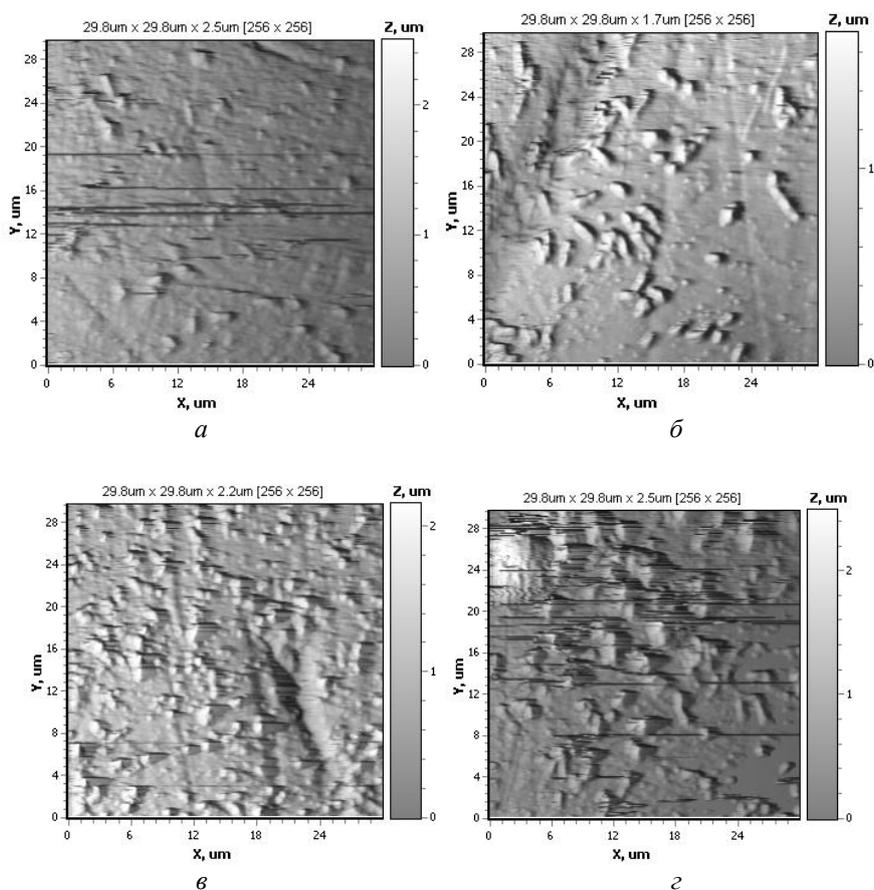


Рисунок 2 – Изображения наноструктур серебра на поверхности латунного сплава: а) без наночастиц, б) 50 мкл, в) 100 мкл, г) 150 мкл

Полученные образцы исследовались на лазерно-эмиссионном анализаторе LIBS, в котором они облучались лазерным излучением YAG:Nd³⁺-лазера с длительностью импульсов ~15 нс. Лазерное излучение направлялось на исследуемый образец латуни, расположенный в ее фокусе. Фокусное расстояние оптической системы равнялось 100 мм. Радиус сфокусированного лазерного пятна составлял ~0,1 мм. По исследуемому образцу осуществлялось воздействие пятью одиночными и двоекными лазерными импульсами с частотой следования 10 Гц. Энергия одиночных и двоекных лазерных импульсов составляла (38,39±0,884) мДж. Для латунных сплавов оптимальная задержка между импульсами составляет 10 мкс. Под воздействием лазерного излучения на поверхности исследуемого образца образовывалась эмиссионная плазма. Регистрация спектров излучения плазмы осуществлялась в направлении близком к обратному по отношению к лазерному пучку. Спектры лазерно-эмиссионной плазмы, полученные при работе лазера в одноимпульсном (а) и двухимпульсном (б) режимах, представлены на рисунке 3.

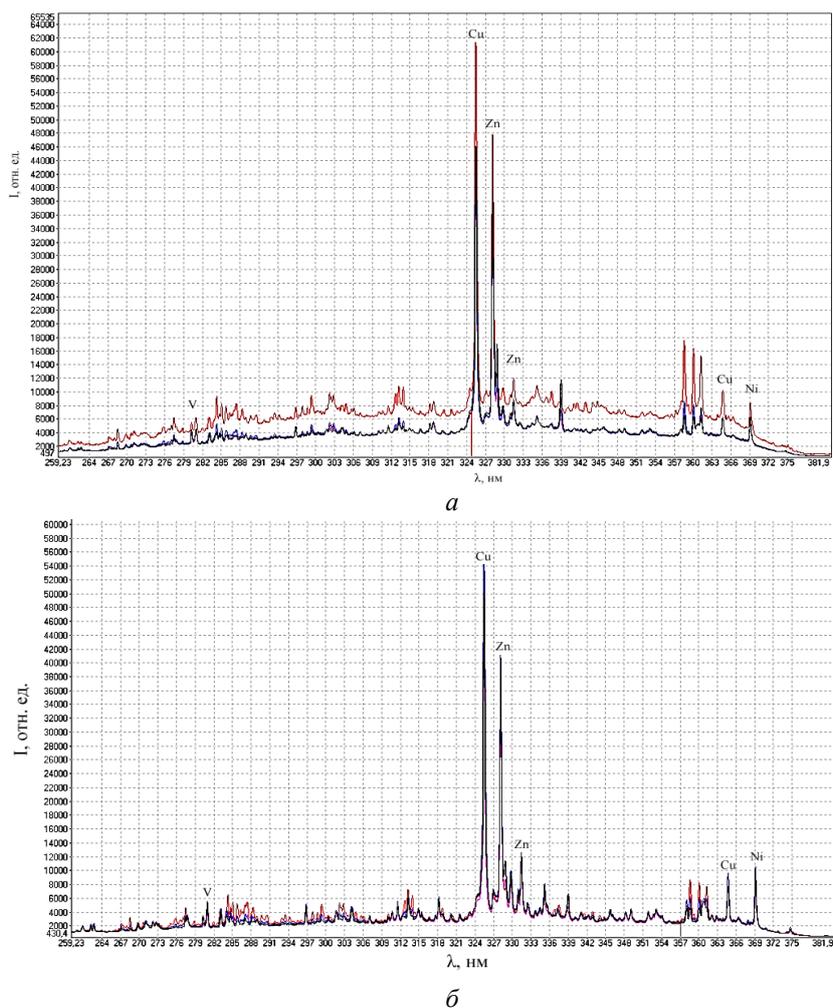


Рисунок 3. Спектры лазерно-эмиссионной плазмы, полученные при абляции латуни марки С 86400: а) одиночными и б) двоекными лазерными импульсами

(■ – без наночастиц, ■ – 50 мкл; ■ – 100 мкл; ■ – 150 мкл)

Анализ спектров, представленных на рисунке 3 позволил установить, что при двухимпульсном режиме работы лазера, спектральный фон излучения уменьшается примерно вдвое. Нанесение наночастиц серебра на поверхность латунного сплава из раствора с концентрацией НЧ Ag $5,8 \cdot 10^{-7}$ моль/дм³, позволило увеличить интенсивность спектральных линий меди Cu I (285,87 нм) и Cu I (283,73 нм) в 2 раза. Можно предположить, что дальнейшее увеличение интенсивностей исследуемых линий меди может быть достигнуто при большей концентрации наночастиц на поверхности латуни.

Таким образом применение наночастиц серебра, размерами 28–42 нм и определенной концентрацией на поверхности сплава латуни позволил вдове увеличить интенсивность анализируемых спектральных линий меди. Использование двухимпульсного режима работы лазера и оптимальной задержки между импульсами

(10 мкс) позволило значительно снизить спектральный фон излучения плазмы, по сравнению с одноимпульсным режимом.

Список литературы

1. Balogh, J. Y. Enhancement of laser-induced optical breakdown using metal/dendrimer nanocomposites / J. Y. Balogh, T. B. Norris // *Appl. Phys. Lett.* – 2002. – Vol. 80 (10). – P. 1713–1715.
2. Ohta, T. Emission enhancement of laser-induced breakdown spectroscopy by localized surface Plasmon resonance for analyzing plant nutrients / T. Ohta, M. Ito, T. Kotani, T. // *Appl. Spectrosc.* – 2009. – Vol. 63 (5). – P. 555–558.
3. De Giacomo, A. Nanoparticle enhanced laser-induced breakdown spectroscopy of metallic samples / A. De Giacomo, R. Gaudiuso, C. Koral, M. Dell'aglio, O. De Pascale // *Anal. Chem.* – 2013. – Vol. 85 (21). – P. 10180–10187.
4. De Giacomo, A. Nanoparticle enhanced laser induced breakdown spectroscopy: effect of nanoparticles deposited on sample surface on laser ablation and plasma emission / A. De Giacomo, R. Gaudiuso, C. Koral, M. Dell'aglio, O. De Pascale // *Spectrochim. Acta. Part B.* – 2014. – Vol. 98. – P. 19–27.
5. De Giacomo, A. Nanoparticle enhanced laser-induced breakdown spectroscopy for microdrop analysis at subppm level / A. De Giacomo, C. Koral, G. Valenza, R. Gaudiuso, M. Dell'aglio // *Anal. Chem.* – 2016. – Vol. 88 (10). – P. 5251–5257.
6. Shen, Jie. Effect of Ag nanoclusters deposited with magnetron sputtering on laser-induced breakdown spectroscopy enhancement / Jie Shen, Keyan Wu, Da Cao, Jijin Wang, Bitao Hu // *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy.* – 2019. – Vol. 156. – P. 59–65.
7. Wu, K. Coulombic effect of amphiphiles with metal nanoparticles on laser-induced breakdown spectroscopy enhancement / K. Wu, J. Shen, D. Cao, H. Cheng, S. Sun, B. Hu // *J. Phys. Chem. C.* – 2018. – Vol. 122 (33). – P. 19133–19138.
8. Dell'aglio, M. Nanoparticle enhanced laser induced breakdown spectroscopy (NELIBS), a first review / M. Dell'aglio, R. Alrifai, A. De Giacomo // *Spectrochim. Acta. Part B.* – 2018. – Vol. 148. – P. 105–112.
9. Sánchez-Aké, C. Intensity enhancement of LIBS of glass by using Au thin films and nanoparticles / C. Sánchez-Aké, T. Garca-Fernández, J. L. Benítez, M. B. de la Mora, M. Villagrán-Muniz // *Spectrochim. Acta, Part B.* – 2018. – Vol. 146. – P. 77–83.
10. Rodríguez-Fernández, J. Seeded growth of submicron Au colloids with quadrupole plasmon resonance modes / J. Rodríguez-Fernández, J. Pérez-Juste, F. J. G. De Abajo, L. M. Liz-Marzán // *Langmuir.* – 2006. – Vol. 22 (16). – P. 7007–7010.
11. Lumerical Solutions, Inc. FDTD Solutions (Version 8.6.0) [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.lumerical.com/> (2013).

The purpose of this work is to perform studies of the clean surfaces of flint plates, semi-conductor chips and optical glass and to establish the parameters of nanoscience. The plates whose surfaces are formed in the planes of cleavages of atomic planes or dislocations are, by parameters, undulation and roughness optimal.

Жернак Михаил Андреевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, tegra@mail.ru.

Курьян Николай Николаевич, старший преподаватель кафедры современных технологий программирования Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, kurian90@mail.ru.

Научный руководитель – *Ануфрик Славмир Степанович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, anufriick@grsu.by.

УДК 533.9.03

Н. В. ЖИДКИНА, М. С. ВЕРБИЦКАЯ, Е. В. ЯЦКЕВИЧ, А. В. АКСЮЧИЦ

МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛА ОБРАБОТКОЙ В ПЛАЗМЕ АТМОСФЕРНОГО РАЗРЯДА

Проводилось исследование влияния плазмы атмосферного разряда на поверхностные свойства стекла. В результате эксперимента была выявлена зависимость коэффициента трения поверхности стекла от времени обработки. За 2–3 минуты обработки удалось достичь уменьшения коэффициента трения поверхности стекла в 3 раза.

С развитием науки и технологий всё большую значимость приобретают поверхностные свойства материалов. Применение многих перспективных и распространённых материалов ограничено, так как они обладают низкой адгезией поверхности. При использовании таких материалов без предварительной обработки при изготовлении различных изделий приводит к расслоению покрытий, браку. Решением является повышение адгезии поверхности, что дает возможность улучшать качество наносимых покрытий, пайки, склеивания. На данный момент самым производительным и экономичным инструментом для изменения гидрофильных свойств (адгезии) является плазма атмосферного разряда. Этот метод может быть интегрирован в единый

технологический цикл и в отличие от химических и физических в вакууме не требует токсичных реактивов, сложного и дорогостоящего оборудования для создания и поддержания вакуума.

Исследовалось изменение гидрофильных свойств стекла при обработке в плазме атмосферного разряда. Для обработки использовалась экспериментальная установка, схема которой представлена на рисунке 1. Она включает в себя баллон с плазмообразующим газом аргоном (1), регулятор расхода газа РРГ-12 (2), обрабатываемую подложку (3), штатив (4), источник питания (5) и разрядную систему (6). В установке используется разрядное устройство коаксиального типа с диэлектрическим барьерным разрядом для создания плазмы диффузного типа при атмосферном давлении. Данная система позволяет формировать плазменный факел длиной до 3 см, с зоной обработки диаметром до 1 см [1].

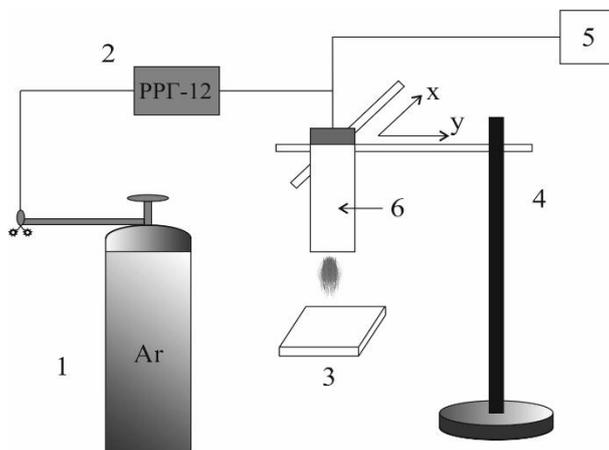


Рисунок 1 – Схематичное изображение экспериментальной установки

Обработка стекла проводилась при мощности разряда 45 Вт, расходе аргона 186 л/ч, расстоянии от факела плазменной установки до материала – 1 см. Время изменялось от 1 до 5 минут с шагом в одну минуту.

Для оценки изменения поверхностных свойств стекла использовалась методика расчёта коэффициента трения по данным, полученным в процессе сканирования материала при помощи атомно-силового микроскопа NT-206. [2] Расчёт коэффициента трения производился на основе измерения средней величины угла закручивания кремниевого зонда вокруг своей оси, при его прямом и обратном движении во время сканирования.

Из графика, полученного от прямого и обратного хода кремниевого зонда при сканировании поверхности стекла (рис. 2), выводились численные значения средней величины закручивания и производился расчёт коэффициента трения в программе Excel.

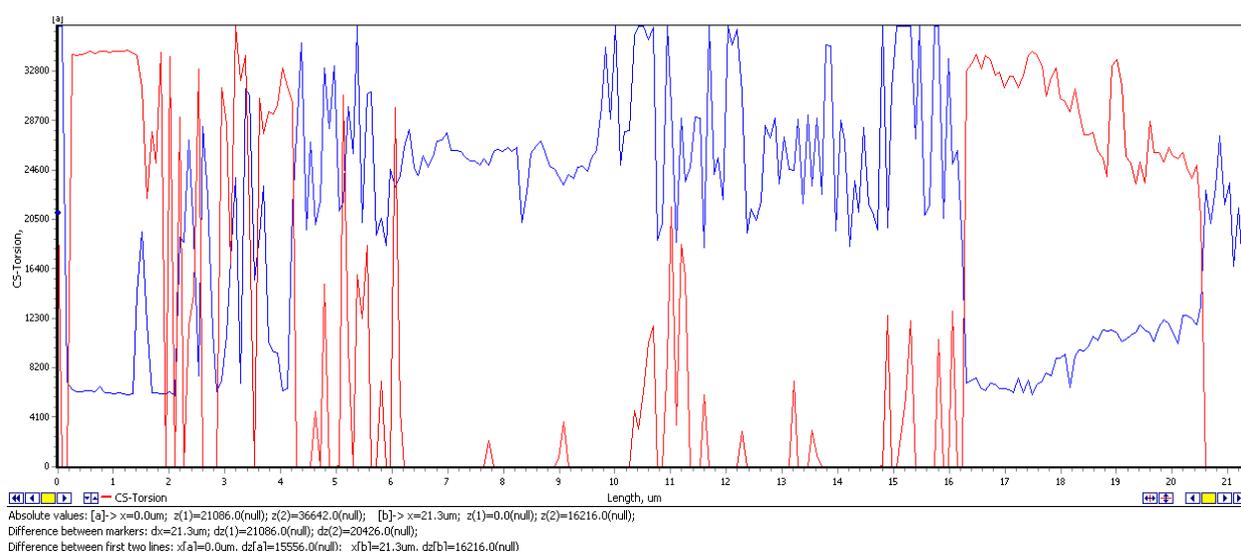


Рисунок 2 – График прямого и обратного хода кремниевого зонда после обработки стекла в плазме в течение 5 минут

На основании расчётов был построен график зависимости коэффициента трения от времени обработки. Данная зависимость представлена на рисунке 3.

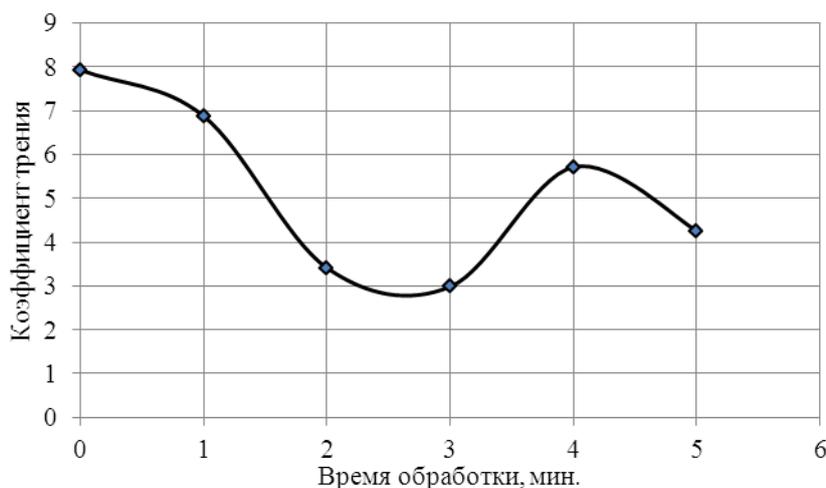


Рисунок 3 – График зависимости коэффициента трения поверхности от времени обработки стекла

Из графика зависимость коэффициента трения от времени обработки видно, что при обработке от 1 до 3 минут коэффициент трения падает. Это связано с тем, что в первые минуты обработки происходят процессы очистки и активации поверхности. Очистка атмосферной плазмой – это процесс удаления с обрабатываемой поверхности адсорбированных газов, влаги, органических и биологических загрязнений, а также пылевидных частиц за счет воздействия плазменных атмосферных потоков при использовании различных ионизированных газов – аргона, воздуха, азота, водорода, паров специальных химических соединений. [3] Активация поверхности состоит в формировании химически активного поверхностного слоя за счет образования свободных радикалов в процессе обработки. В результате активации повышается поверхностная энергия поверхности, что улучшает смачиваемость.

Однако при обработке плазмой более 3-х минут коэффициент трения возрастает и при приближении к 5 минутам вновь падает. Вероятнее всего такое увеличение коэффициента трения связано с тем, что при обработке поверхности плазмой на обычном воздухе, а не в вакууме, происходит окисление атомарно чистой поверхности и это приводит к понижению адгезии. При последующей обработке происходит повторная очистка поверхности, за счёт чего гидрофильные свойства улучшаются.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что максимальное значение коэффициента трения, а, значит, и наибольшая адгезионная способность, достигается, при обработке поверхности стекла в плазме атмосферного давления в течении 3 минут. Увеличение времени обработки не приводит к улучшению, но увеличивает себестоимость обработки. Таким образом, воздействие плазмы атмосферного разряда на поверхность стекла в течении 3 минут позволят получать более качественные покрытия.

Список литературы

1. Котов, Д. А. Изучение параметров плазменной струи генерируемой диэлектрическим барьерным разрядом / Д. А. Котов, Я. И. Шукевич, О. С. Сигай // Молодёжь в науке – 2016 : материалы междунар. конф. – Минск : Бел. наука, 2017. – С. 348–356.
2. Миронов, В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии : учеб. пособие / В. Л. Миронов. – Нижний Новгород : РАН, 2004. – 110 с.
3. Шмаков, М. Очистка поверхности пластин и подложек / М. Шмаков, В. Паршин, А. Смирнов // Технологии в электронной промышленности. – 2008. – № 6. – С. 72–75.

The effect of atmospheric-discharge plasma on the surface properties of glass was studied. As a result of the experiment, the dependence of the coefficient of friction of the glass surface on the processing time was revealed. In 2–3 minutes of processing, it was possible to reduce the coefficient of friction of the glass surface by 3 times.

Жидкина Наталья Владимировна, студентка факультета радиотехники и электроники (кафедра микро- и нанoeлектроники) Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, natali.zhidkina.16@gmail.com.

Яцевич Екатерина Вадимовна, магистрант факультета радиотехники и электроники (кафедра микро- и нанoeлектроники) Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, k_yatsevich@mail.ru.

Вербицкая Маргарита Сергеевна, студентка факультета радиотехники и электроники (кафедра микро- и нанoeлектроники) Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, margarver1999@gmail.com.

Аксочиц Александр Владимирович, магистрант факультета радиотехники и электроники (кафедра микро- и нанoeлектроники) Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, alex.ak11996@mail.ru.

Научный руководитель – *Котов Дмитрий Анатольевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, kotov@bsuir.by.

УДК 539.2/669(2-8)

Д. А. ЗЕРНИЦА

ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ СПЛАВОВ (Sn–Zn)_{эвт} – 4 мас. % (Sb) и (Sn–Zn)_{эвт} – 4 мас. % (Al)

В работе представлены результаты исследования быстрозатвердевших фольг эвтектических сплавов (Sn–Zn)_{эвт} – 4 мас. % Sb и (Sn–Zn)_{эвт} – 4 мас. % Al, приведены данные рентгенографического анализа с описанием наблюдаемых текстур в фольгах, изменение микротвёрдости в результате изохронного отжига.

Внимание к сплавам системы Sn–Zn обусловлено их практической значимостью, ввиду использования их в качестве легкоплавких припоев как альтернативной замене свинцовсодержащим сплавам. Влияние условий охлаждения изучалось рядом авторов. Низкие скорости охлаждения приводят к формированию дендритной неравномерной структуре с областями различного состава [1]. Повышение скорости охлаждения до 20 К/с приводит от уменьшения расстояний между дендритами, до их полного исчезновения, т.е. наблюдается переход к ячеистому росту. Высокие скорости охлаждения (до 10⁶ К/с) приводят к формированию неравновесных фаз, измельчению структуры сплава, образованию пересыщенного твёрдого раствора, а значит имеет актуальность и практическую значимость. В работе представлены результаты исследования текстуры и микротвёрдости быстрозатвердевших фольг сплавов системы (Sn–Zn)_{эвт} – 4 мас. % Sb и (Sn–Zn)_{эвт} – 4 мас. % Al.

Исходные материалы были получены сплавлением компонентов (чистота не менее 99,99 %) в кварцевых ампулах, с последующим инжeksiрованием капли расплава на медную поверхность цилиндра, вращающегося с линейной скоростью 15 м/с. Толщины фольг находились в пределах 40–60 мкм. Исследование текстуры быстрозатвердевших фольг проводилось с помощью рентгенографического анализа, с использованием дифрактометра Rigaku Ultima IV. Индексы дифракционных отражений hkl исследуемых образцов фольг определялись по базам данных ICDD: International Centre of Diffraction Data (порошковая база данных PDF2 или PDF4). Текстура быстрозатвердевших фольг изучалась методом обработки полюсных фигур дифракционных линий, полюсные плотности дифракционных линий P_{hkl} рассчитывалась по методу Харриса. Отжиг фольг проводился в сушильном шкафу SNOL, каждые 20 °С. Микротвёрдость снималась на приборе ПМТ-3 при нагрузке 20 г для фольг, и на приборе ТПП-2 при нагрузке 5 кг для массивных образцов, локально индентировались не менее 10 отпечатков, погрешность измерений не превышала 5 %.

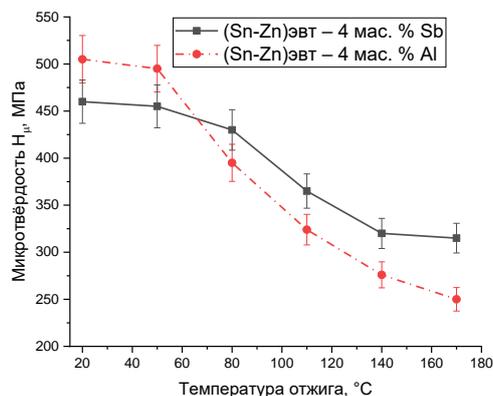
На рентгенограммах в фольгах сплавов (Sn–Zn)_{эвт} – 4 мас. % Sb и (Sn–Zn)_{эвт} – 4 мас. % Al наблюдаются дифракционные линии цинка (0002, 10 $\bar{1}$ 0, 10 $\bar{1}$ 1, 10 $\bar{1}$ 2 и др.) и олова (200, 101, 211 и др.), следовательно, фольга быстрозатвердевших сплавов состоит из твёрдых растворов олова и цинка. В сплаве, содержащего алюминий, дополнительные дифракционные линии легирующего компонента не наблюдаются, в то время как в фольге сплава (Sn–Zn)_{эвт} – 4 мас. % Sb обнаружены дифракционные линии, принадлежащие фазе антимонида цинка.

Ранее наблюдались аналогичные текстуры олова и цинка в чистых металлах [2; 3; 4], возникающие вследствие ориентированного роста тех зёрен, у которых наиболее плотноупакованные плоскости (100) олова и (0001) цинка перпендикулярны тепловому потоку, и имеют наибольшее межплоскостное расстояние d . Легирование эвтектики сурьмой или алюминием приводит к ослаблению текстур цинка (таблица 1), что является следствием неодинакового влияния легирующих компонентов на скорость перемещения межфазной границы в том или ином направлении, что наблюдалось ранее в сплавах Zn–Pb [3].

Таблица 1 – Полусные плотности дифракционных линий фольг сплавов системы $(\text{Sn-Zn})_{\text{эвт}} - 4 \text{ мас. \% Sb}$ и $(\text{Sn-Zn})_{\text{эвт}} - 4 \text{ мас. \% Al}$

Sn	Sn–8,8 Zn	Sn–8,8 Zn– 4 Al	Sn–8,8 Zn– 4 Sb	Zn	Sn–8,8 Zn	Sn–8,8 Zn– 4 Al	Sn–8,8 Zn– 4 Sb
200	1,9	1,5	2,0	0002	1,7	1,2	0,0
101	1,7	1,3	1,6	10$\bar{1}$0	1,2	1,3	0,0
220	0,4	0,7	0,7	10$\bar{1}$1	0,6	0,7	3,4
211	0,5	0,8	0,6	10$\bar{1}$2	1,0	1,1	0,0
301	0,5	0,6	0,4	1$\bar{1}$20	0,7	0,8	0,0
112	1,0	1,0	0,6	1$\bar{1}$22	0,8	1,0	3,6
				2021	1,1	0,9	0,0

Быстрозатвердевшие эвтектические сплавы находятся в неустойчивом состоянии, и при их нагреве наблюдается изменение механических свойств. При распаде, начинающемся после 50 °С, происходит перераспределение компонентов. На рисунке 1 приведён график изменения микротвёрдости H_{μ} быстрозатвердевших фольг сплавов $(\text{Sn-Zn})_{\text{эвт}} - 4 \text{ мас. \% Sb}$ и $(\text{Sn-Zn})_{\text{эвт}} - 4 \text{ мас. \% Al}$ от температуры изохронного отжига (°С).



Рисунки 1 – Зависимость микротвёрдости фольг и массивов от температуры отжига

Микротвёрдость фольг превышает микротвёрдость массивных образцов в 1,6 и в 1,2 раза для эвтектики, легированной алюминием и сурьмой соответственно, что связано с действием в быстрозатвердевших фольгах механизма упрочнения вследствие формирования микрокристаллической структуры.

После достижения 50 °С наблюдается уменьшение микротвёрдости в результате распада пересыщенного твёрдого раствора, что коррелирует с ранее полученными результатами исследования эвтектического сплава [5]. В результате сверхбыстрой кристаллизации эвтектического сплава Sn–8,8 мас. % Zn он содержит однородно распределённые частицы цинка в фольге, а отжиг способствует растворению малых частиц и росту крупных частиц цинка и олова.

Таким образом, суммируя всё вышеизложенное, можно сделать вывод, что легирование эвтектического сплава третьим компонентом влияет на поведение микротвёрдости. При изохронном отжиге после достижения 50 °С наблюдается немонокотное уменьшение микротвёрдости для эвтектического сплава, легированного сурьмой и алюминием, затухающее в области высоких температур плавления эвтектики. Обнаружение дифракционных линий олова и цинка говорит о том, что быстрозатвердевшие сплавы состоят из твёрдых растворов олова и цинка. Легирование эвтектического сплава Sn или Al ведёт к ослаблению текстур цинка вследствие неодинакового влияния легирующих компонентов на скорость перемещения межфазной границы в том или ином направлении. Формирование однородно распределённых дисперсных частиц по всему объёму быстрозатвердевшей фольги объясняется высокими скоростями охлаждения расплава, что в свою очередь приводит к его переохлаждению. Переохлаждённый жидкий раствор, пересыщенный оловом и цинком, находится в неустойчивом состоянии, и в результате флуктуаций происходит спиноподальный распад, в результате которого возникают области, обогащённые тем или иным компонентом, которые превращаются в зародыши кристаллических фаз.

Список литературы

1. Interfacial Properties of Zn–Sn Alloys as High Temperature Lead-Free Solder on Cu Substrate / J. E. Lee [et al.] // Materials Transactions. – Vol. 46, No. 11 (2005). – P. 2413–2418.
2. Шепелевич, В. Г. Быстрозатвердевшие легкоплавкие сплавы / В. Г. Шепелевич. – Минск : БГУ, 2015. – 192 с.
3. Лозенко, В. В. Зёрненная и субзёрненная структура быстрозатвердевших фольг цинка и его бинарных сплавов с Cd, Sn и Sb / В. В. Лозенко, В. Г. Шепелевич // Неорганические материалы. – 2007. – Т. 43. № 1. – С. 22–26.
4. Шепелевич, В. Г. Структура и свойства быстрозатвердевших фольг системы Sn–Zn / В. Г. Шепелевич, О. В. Гусакова // Неорганические материалы. – 2008. – Т. 44. № 5. – С. 560–564.
5. Шепелевич, В. Г. Структура быстрозатвердевшей фольги эвтектического сплава Sn – 8,8 мас. % Zn / В. Г. Шепелевич, Д. А. Зерница // Журн. Бел. гос. ун-та. Сер., Физика. – 2018. – № 1. – С. 67–72.

The paper presents the results of a study of rapidly solidified foils of eutectic alloys $(\text{Sn-Zn})_{\text{eut}} - 4 \text{ wt. } \% (\text{Sb})$ and $(\text{Sn-Zn})_{\text{eut}} - 4 \text{ wt. } \% (\text{Al})$, presents the data of X-ray analysis with a description of the observed textures in the foils, the change in microhardness as a result of isochronous annealing.

Зерница Денис Александрович, Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина, Мозырь, Беларусь, dzernitsa@mail.ru.

Научный руководитель – *Шепелевич Василий Григорьевич*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, shepelevich@bsu.by.

УДК 539.1:544.52:544.77:535.37

П. В. КАРПАЧ

СПЕКТРЫ ИК ПОГЛОЩЕНИЯ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫХ ФОТОХРОМНЫХ НАНОСТРУКТУР

Методами спектроскопии инфракрасного (ИК) поглощения и квантовой химии изучены структура и фотохромные превращения флуоресцентных фотохромных наноструктур на основе диарилэтенов и полупроводниковых квантовых точек в твердофазных пленках.

В качестве базы для разработки перспективных устройств молекулярной электроники и фотоники наиболее подходят фотохромные соединения, которые под действием света обратимо изменяют свои свойства и могут использоваться в качестве фотопереключателей различного типа [1]. Термостабильные диарилэтены (ДАЭ) являются одним из наиболее перспективных классов фотохромных соединений, применяемых в этих целях. В последние годы значительное внимание уделяется исследованию свойств фотохромных систем и фотоиндуцированной флуоресценции органических и неорганических соединений с использованием фотохромных веществ и индуктивного (Фёрстеровского флуоресцентного резонансного) переноса энергии [2]. В качестве флуорофоров перспективно использовать полупроводниковые квантовые точки (КТ), в частности наночастицы CdSe/ZnS [3; 4]. Они обладают важными свойствами: широкой спектральной областью возбуждения флуоресценции, узкой полосой флуоресценции, высокой яркостью свечения и фотостабильностью.

В настоящей работе с применением методов спектроскопии инфракрасного (ИК) поглощения и квантовой химии исследованы фотоиндуцированные изменения молекулярной структуры диарилэтена (ДАЭ2) и системы КТ-ДАЭ2 (рисунок 1) в твердофазных пленках. Спектры ИК поглощения ДАЭ2 и системы КТ-ДАЭ2 (рисунок 2) зарегистрированы с применением ИК-Фурье спектрометра Nicolet iS10 (Thermo Scientific).

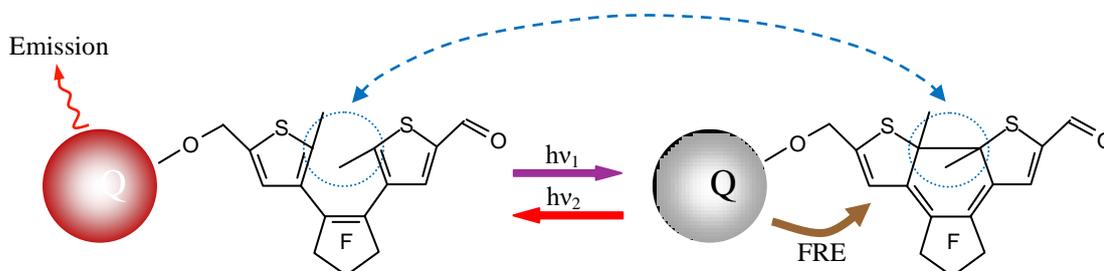


Рисунок 1 – Схема фотоиндуцированных изменений флуоресцентных фотохромных наноструктур

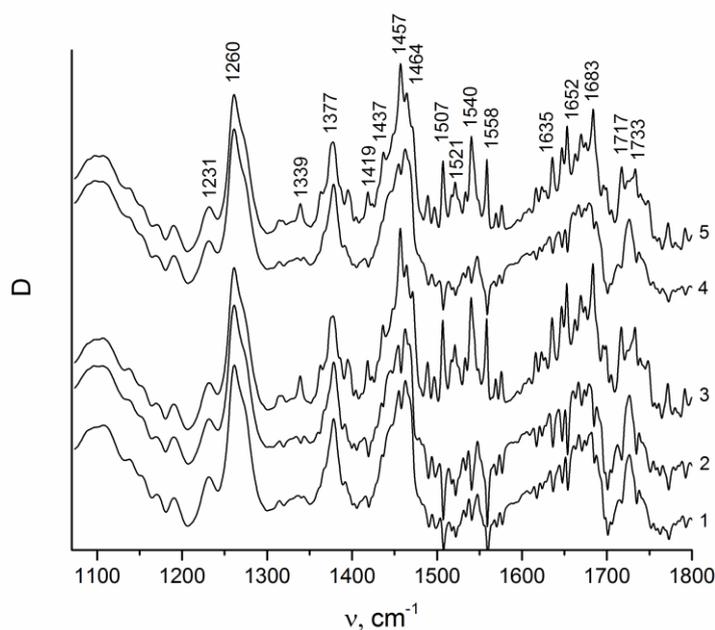


Рисунок 2 – Спектры инфракрасного поглощения системы КТ-ДАЭ2 в твёрдофазной плёнке на пластине NaCl из раствора в толуоле: 1 – до облучения; 2 – после УФ ($\lambda = 365$ нм) облучения в течение 120 с; 3 – после последующего облучения светом $\lambda = 627$ нм в течение 120 с; 4 – после последующего УФ ($\lambda = 365$ нм) облучения в течение 120 с; 5 – после последующего облучения светом $\lambda = 627$ нм в течение 120 с

При интерпретации ИК спектров использовались результаты квантово-химических расчетов молекулы ДАЭ2. Квантово-химические расчеты выполнены с использованием программного пакета PC GAMESS 7.1.G (Firefly). Равновесная геометрия и колебательные спектры молекулы ДАЭ2 рассчитаны с использованием теории функционала плотности (DFT), гибридного трехпараметрического обменного функционала Беке с корреляционным функционалом Ли – Янга – Парра (B3LYP). Расчет КР спектров молекул (рисунок 3) проводился *abinitio* методом с использованием базиса 6-31G (d, p).

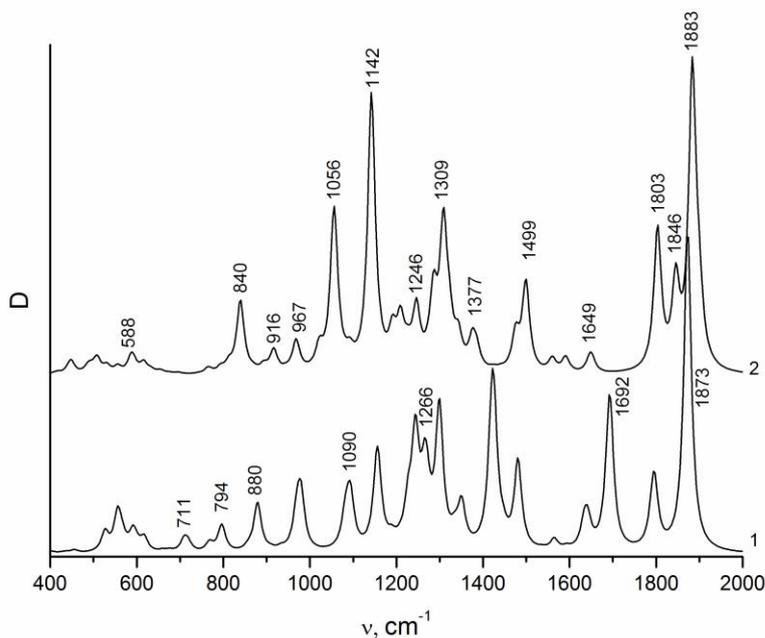


Рисунок 3 – Расчётные спектры инфракрасного поглощения открытой (1) и циклической (2) форм молекулы ДАЭ2

Анализ ИК спектров показывает наличие значительных фотоиндуцированных изменений, обусловленных многократной обратимой валентной фотоизомеризацией молекул фотохромного соединения. Колебание С-С связи, участвующей в обратимой валентной фотоизомеризации, проявляется в ИК спектрах пленок как чистого диарилэтена ДАЭ2 (полосы около 969 см^{-1} и 1023 см^{-1}), так и системы КТ-ДАЭ2 (полосы около 1339 см^{-1} и 1419 см^{-1} (рисунок 2)). Интересно отметить, что, судя по спектральным проявлениям, в полученной исходной (в результате испарения толуола) твердофазной пленке на поверхности пластины NaCl произошла циклизация молекул фотохромного соединения. Что не препятствует в дальнейшем их многократным фотохромным превращениям.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Ф18Р-074) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-33-00010 Бел_а).

Список литературы

1. Molecular switches / ed. B. L. Feringa. – Weinheim : Wiley, 2001.
2. Klajn, R. Nanoparticles functionalized with reversible molecular and supramolecular switches / R. Klajn, J. F. Stoddart, B. A. Grzybowski // Chem. Soc. Rev. – 2010. – Vol. 39. – P. 2203–2237.
3. Imaging Quantum Dots Switched On and Off by Photochromic Fluorescence Resonance Energy Transfer (pcFRET) / E. Jares-Erijman [et al.] // Mol. Cryst. Liq. Cryst. – 2005. – Vol. 430. – P. 257–265.
4. Photoinduced Reversible Modulation of Fluorescence of CdSe/ZnS Quantum Dots in Solutions with Diarylethenes / P. V. Karpach [et al.] // Journal of Fluorescence. – 2019. – Vol. 29, № 6. – P. 1311–1320.

The infrared (IR) absorption spectroscopy and quantum chemistry methods have been used to study the structure and photochromic transformations of fluorescent photochromic nanostructures based on diarylethenes and semiconductor quantum dots in solid-phase films.

Карпач Павел Викторович, аспирант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, pavel_karpach@mail.ru.

Научный руководитель – *Василюк Геннадий Тимофеевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, vasilyuk@grsu.by.

УДК 577.352

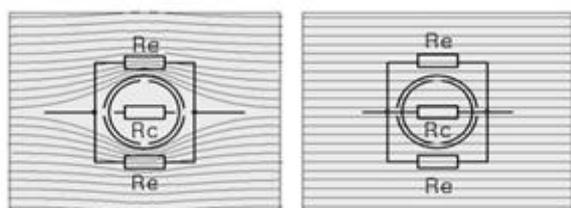
П. С. КИРИКОВИЧ

ЁМКОСТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ КЛЕТОЧНЫХ МЕМБРАН БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ БИОИМПЕДАНСНЫМ СПОСОБОМ

Рассмотрен метод биоимпедансного анализа состава тела человека, основанный на измерении электрических параметров тела человека при зондировании его низко- и среднечастотными сигналами. Приведены причины возникновения емкостных свойств клеточных мембран и их строение. Описан метод расчета емкости клеточных мембран на примере упрощенной эквивалентной схемы биологического объекта.

Биоимпедансная спектроскопия – это методика, позволяющая не инвазивно, оперативно, количественно оценить объемы жидких фракций тела человека (общей воды организма, внеклеточной и внутриклеточной жидкости). В основе биоимпедансного анализа лежит определение электрического импеданса биологических объектов. С использованием специальных приборов (биоимпедансных анализаторов) организм может проводить электрический ток, с помощью них же можно измерить импеданс всего тела или отдельных его частей. На этой способности основан принцип биоимпедансного анализа. Чем выше содержание воды, тем меньше импеданс и наоборот, то есть биоимпедансный анализ обратно пропорционален содержанию жидкости в тканях организма. Частотные и морфологические особенности жидкостей и тканей обуславливают электропроводные свойства измерения их импеданса. Для дифференцированного определения объемов внеклеточной и клеточной жидкости данные свойства позволяют выполнять дисперсионный анализ. Низкочастотный ток, огибая клеточные мембраны, может проходить лишь через межклеточное пространство. В то время как высокочастотный ток проходит через собственно клетку и межклеточное пространство (рисунок 1). Импедансом называют полное электрическое сопротивление тканей. Биоимпеданс имеет две составляющие: активное сопротивление (R) и реактивное сопротивление (X_c). Состав тканей человека может быть определен, анализируя активное и реактивное их сопротивление. Активное сопротивление обусловлено наличием

жидкости в организме человека (клеточная и внеклеточная), обладающие ионной проводимостью. Реактивное сопротивление характеризуется смещением фазы тока относительно напряжения за счет емкостных свойств клеточных мембран, способных накапливать электрический заряд на своей поверхности. По своим электрическим свойствам клеточные мембраны являются конденсаторами, с зависящей от частоты переменного тока емкостью. В электролитическом растворе под действием электрического поля с обеих сторон мембраны ионы перемещаются к ее поверхности, пока поле накопленных зарядов не скомпенсирует внешнее поле. В результате происходит накопление заряда и электрической энергии. Мембраны представляют собой очень тонкий внешний покров клетки (рисунок 2). В состав мембраны входят три слоя толщиной около двадцати пяти ангстрем. Наружный и внутренний слои состоят из молекул белков, расположенных в один ряд. В состав среднего слоя входят молекулы липидов, располагающихся в два ряда. Цитоплазматическая мембрана обладает избирательной проницаемостью для различных веществ. Она легко пропускает в клетку одни вещества, но более или менее сильно задерживает другие.



а б

Рисунок 1 – Прохождение тока через клеточную мембрану: а) на низкой частоте тока, б) на высокой частоте тока

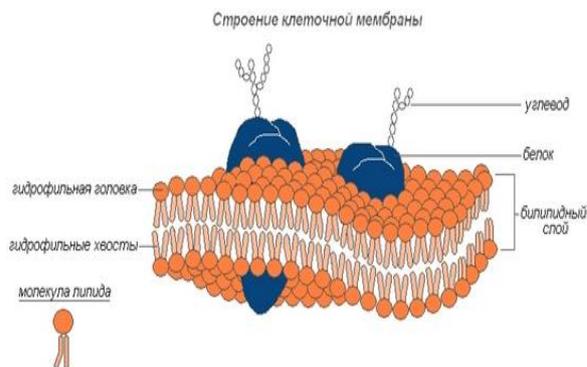


Рисунок 2 – Строение клеточной мембраны

Удельное сопротивление биологических тканей, определяемое для заданной частоты тока, может существенно изменяться под влиянием физиологических факторов: почки и легкие изменяют электропроводность при различном крове- и воздухонаполнении, мышечные ткани – при различной степени сокращения мышц, кровь и лимфа – при изменении концентрации белков и электролитов, очаги повреждения (по сравнению с нормальной тканью) – в результате отеков или ишемий различной природы, опухолей и других причин. Это позволяет использовать биоимпедансометрию для количественной оценки состояния органов и систем организма при различных заболеваниях, а также для выявления изменений в тканях, вызываемых лекарственными, физическими и другими нагрузками.

Для определения емкости клеточных мембран мы используем упрощенную эквивалентную схему биологического объекта (рисунок 3).

В данной схеме $R_{\text{ЕКЖ}}$, $R_{\text{КЖ}}$ – омическое сопротивление межклеточной и внутриклеточной жидкости, C_M – емкость клеточных мембран. С ростом частоты переменного тока реактивное сопротивление уменьшается, и все большая часть тока проходит внутрь клеток. Используя правило расчета импедансов параллельного и последовательного соединения, получаем:

$$R = \frac{R_e + w^2 C_m^2 R_e R_i (R_e + R_i)}{1 + w^2 C_m^2 (R_e + R_i)^2}, \quad (1)$$

$$X_C = \frac{w C_m R_e^2}{1 + w^2 C_m^2 (R_e + R_i)^2},$$

где R_e – омическое сопротивление межклеточной жидкости, R_i – омическое сопротивление внутриклеточной жидкости, C_m – емкость клеточных мембран, R – активное омическое сопротивление, X_C – реактивное омическое сопротивление, w – частота переменного тока.

На основании данных формул с помощью параметров, полученных в результате биоимпедансометрии (R_e, R, X_C), а также зная значение частоты переменного тока, можно рассчитать емкость клеточных мембран с помощью математического пакета Wolfram Mathematica 10 (таблица).

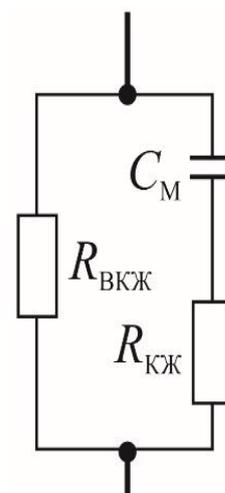


Рисунок 3 – Упрощённая эквивалентная схема биологического объекта

Таблица – Ёмкостные значения для лиц подросткового возраста

Возр.	Рост (см)	Масса (кг)	R_0 (5кГц)	R_0 (50кГц)	X_c	$C_m * 10^{-10}$
14	177	58	679	610	66	15.7
14	186	70	626	552	70	19.1
14	175	63	666	592	75	17.4
15	174	61	659	571	74	17.8
15	183	73	443	353	74	39.6
15	183	58	731	662	71	14.1
15	168	55	613	538	66	19.4
15	174	62	538	455	72	26.3
15	177	77	445	369	55	34.4

Список литературы

1. Биоимпедансный анализ состава тела человека / Д. В. Николаев [и др.]. – М. : Наука, 2009. – 392 с.
2. Deurenberg, P. Multi-frequency impedance for the prediction of extracellular water and total body water / P. Deurenberg, A. Tagliabue, F. J. M. Schouten // Brit. J. Nutr. – 1995. – Vol. 73. – P. 349–358.

In this article, there were considered the causes of occurrence of cellular membranes' capacitive properties and its structure. There was described method of calculation of cellular membranes' capacity for biological object with the help of mathematical package Wolfram Mathematica 10.

Кирикович Павел Сергеевич, магистрант 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь.

Научный руководитель – *Жарнов Александр Михайлович*, кандидат физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

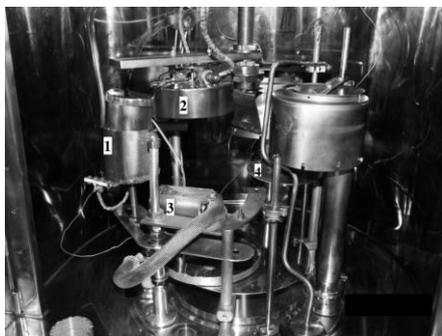
УДК 544.654.2

Е. А. КОЛЕСНИКОВА

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ПЛЁНОК АНТИМОНИДА ИНДИЯ (InSb), ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВЗРЫВНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ

Рассматриваются результаты измерения холловской разности потенциалов плёнок антимонида индия (InSb), полученных методом взрывного термического испарения, при разной температуре осаждения. Экспериментальным методом установлено, что применение при осаждении смешанной шихты с разной концентрацией носителей позволяет получить термостабильные тонкие плёнки, для которых падение холловской разности потенциалов с ростом температуры на 90 °С составляет 0,34 мВ.

Антимонид индия (InSb) полупроводниковое соединение типа $A^{III}B^V$ с рекордно высокой подвижностью электронов. На основе этого материала изготавливают широкий класс микроэлектронных приборов, для создания которых необходимо получение плёночных структур антимонида индия с использованием методов вакуумного осаждения. В данном исследовании применялся метод взрывного термического испарения, схема установки для осуществления которого представлена на рисунке 1. Данный метод основан на испарении в вакууме порошков, подаваемых на испаритель, нагретый до температуры, позволяющей за миллисекунды переводить кристаллические частицы в пар [1].

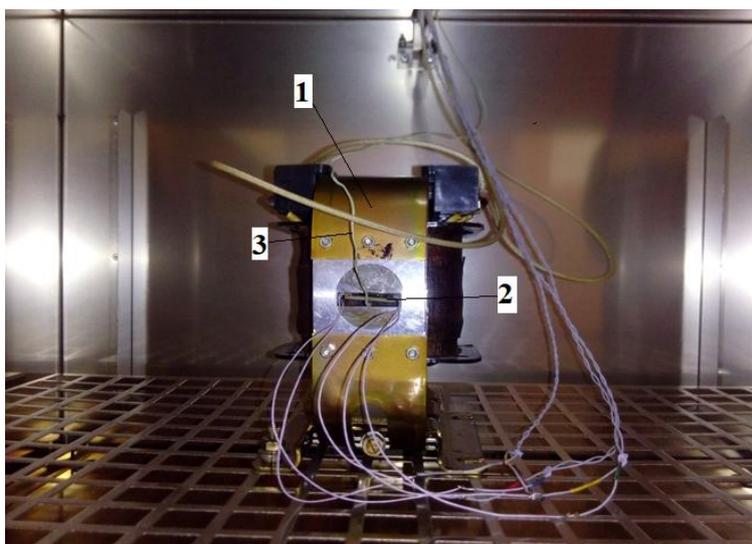


1 – вибробункер, 2 – подложка-держатель с нагревателем, 3 – испаритель, 4 – заслонка испарителя

Рисунок 1 – Схема вакуумной установки AUTO500

Напыление антимолида индия проводилось на полированные подложки из арсенида галлия через маски, что обеспечивало осаждение пленки в виде прямоугольника 5×10 мм с контактными дорожками для соединения с золотыми контактными проводами. При этом температура испарителя составляла $1200\text{--}1500$ °С, а температура нагревателя варьировалась от 370 до 460 °С. Интервалы этих температур, а также толщина полученных пленок ($2,5\text{--}3,0$ мкм) были выбраны на основе обзора литературных данных [2; 3; 4], чтобы добиться высоких значений эффекта Холла и подвижности носителей.

После получения плёночных структур проводились измерения температурной зависимости проводимости и эффекта Холла на специальной установке (рисунок 2), в которой через образец проходил постоянный ток, и поддерживалось постоянное магнитное поле. Поле создаётся электромагнитом, на который подаются напряжения и ток, имеющие постоянные значения. Пропуская через образец постоянный электрический ток I и, включая в перпендикулярном направлении току магнитное поле, возникает разность потенциалов U_x в направлении перпендикулярном и току, и магнитному полю. Создаваемое поле имеет величину магнитной индукции $B = 0,43$ Тл, значение которой определялось измерителем магнитных полей ИМП-1. В данной установке образец находится в термостатированной среде. Интервал изменения температуры составляет $20\text{--}120$ °С.



1 – электромагнит, 2 – образец с подведёнными контактами, 3 – термопара

Рисунок 2 – Устройство термостатированного шкафа

Важной характеристикой датчиков на основе эффекта Холла является степень влияния температуры на изменение холловской разности потенциалов. Известно, что подвижность носителей заряда в полупроводниковых материалах зависит от температуры. Чем меньше степень влияния температуры на изменение холловской разности потенциалов, тем более низкой погрешностью обладает датчик Холла при изменении температуры окружающей среды. Поэтому, в данной работе исследовались зависимости холловской разности потенциалов полученных плёнок антимолида индия от температуры.

В данной работе были исследованы следующие образцы: образец 2: температура осаждения – 418 °С, толщина – $2,5$ мкм; образец 5: температура осаждения – 375 °С, толщина – $3,0$ мкм; образец 6: температура осаждения – 371 °С, толщина – $3,0$ мкм. График зависимости холловской разности потенциалов от температуры плёнок антимолида индия представлены на рисунке 3.

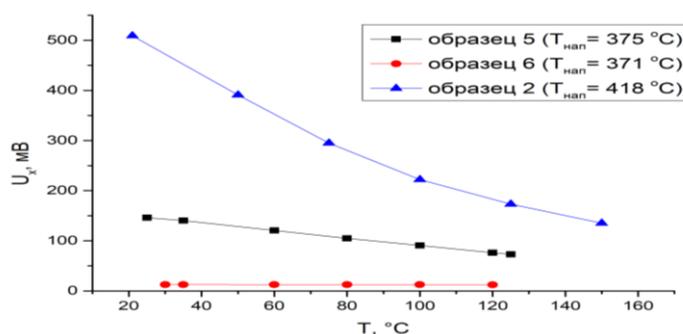


Рисунок 3 – График зависимости холловской разности потенциалов от температуры для образцов 2, 5 и 6

На основании полученной температурной зависимости холловской разности потенциалов видно, что образец, температура осаждения которого составляет 418 °С, имеет сильную зависимость эффекта Холла от температуры. Так, при изменении температуры от 20 до 150 °С холловская разность потенциалов изменяется более, чем на 300 мВ.

Образец 5, осаждённый при температуре 375 °С, имеет лучшую температурную стабильность эффекта Холла. Для данного образца холловская разность потенциалов изменяется на 65 мВ в исследуемом интервале температур (рисунок 3).

Дальнейшие исследования были направлены на увеличение термической стабильности холловской разности потенциалов осаждаемых плёнок. Для этого применялся экспериментальный подход, суть которого заключается в увеличении концентрации электронных носителей в осаждаемой плёнке за счёт применения для осаждения совместной шихты из ИСЭ-0 и ИСЭ-2. Обе шихты имеют электронный тип проводимости, но отличаются значениями концентрации носителей заряда: ИСЭ-0 – $(0,3-3) \cdot 10^{15}$, ИСЭ-2 – $3 \cdot 10^{15}-2 \cdot 10^{16}$.

Известно, что увеличение концентрации электронов будет уменьшать исходную величину холловской разности потенциалов плёнки, однако, для применения датчиков Холла в промышленных устройствах, работающих в условиях нагрева (моторы, компрессоры и т.д.), температурная стабильность является наиважнейшей характеристикой. Промышленное применение датчиков Холла предполагает, что при комнатной температуре холловская разность потенциалов плёнки не должна быть меньше 10 мВ. Было сделано множество экспериментов по осаждению плёнок из смешанной шихты из ИСЭ-0 и ИСЭ-2. Наилучший результат был получен при отношении по массе шихт ИСЭ-0 и ИСЭ-2, как 1 к 14 (образец 6, рисунок 3).

Таким образом, применение при осаждении смешанной шихты, при ранее установленной оптимальной температуре осаждения 371–375 °С даёт возможность получения тонких плёнок, имеющих слабую зависимость эффекта Холла от температуры. Падение холловской разности потенциалов с ростом температуры на 90 °С в такой плёнке составляет 0,34 мВ. Данный результат позволяет применять такие плёночные структуры в производстве датчиков Холла, работающих в условиях нагрева.

Список литературы

1. Технология тонких пленок : справочник / под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. – М.: Советское радио. 1977. – Т. 1.
2. Гуляев, А. М. Влияние избытка компонентов на электрические свойства пленок антимонида индия / А. М. Гуляев, А. С. Шитников // Физика и техника полупроводников. – 2015. – № 2 (49). – С. 214–218.
3. Textural properties of InSb thin films / M. Oszwaldowska [et al.] // Journal of Crystalline Growth. – 2004. – № 265. – P. 83–93.
4. Oszwaldowska, M. Hall sensors made of n-InSb/GaAs epitaxial layers for low temperature applications / M. Oszwaldowska, T. Berus // Thin Solid Films. – 2006. – № 515. – P. 2692–2695.
5. Кучис, Е. В. Методы исследования эффекта Холла / Е. В. Кучис/ – М. : Сов. радио, 1974. – 328 с.

Experimental results of measuring the Hall potential difference between the indium antimonide (InSb) films obtained by explosive thermal evaporation at various deposition temperatures. It was established by an experimental method that the use of a mixed powder with different carrier concentrations during deposition makes it possible to obtain thermostable thin films for which the Hall potential difference decreases by 0.34 mV with a temperature change of 90 °C.

Колесникова Евгения Александровна, физический факультет, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, kolesnikova.ar@gmail.com.

Научный руководитель – *Углов Владимир Васильевич*, доктор физико-математических наук, профессор, физический факультет, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, uglov@bsu.by.

УДК 54-31+665.654

Р. С. ЛАТЫПОВ

ФАЗОВО НЕОДНОРОДНАЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ СЛОИСТОГО КОБАЛЬТИТА КАЛЬЦИЯ

Твердофазным методом синтезирована керамика состава $\text{Ca}_{3-x}\text{Co}_{4-y}\text{O}_{9+\delta}$ ($x, y = 0, 0.2, 0.4, 0.6$), изучено влияние состава и термической предистории на ее термоэлектрические свойства. Установлено, что спекание керамики при температуре выше температуры перитектоидного распада с последующим длительным низкотемпературным отжигом приводит к значительному повышению плотности керамики. Создание в керамике фазовой неоднородности позволяет получить материалы с улучшенными термоэлектрическими характеристиками.

Слоистый кобальтит кальция ($\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$) является перспективной основой для разработки материалов p -ветвей высокотемпературных термоэлектродгенераторов, в которых теплота, выделяющаяся в окружающую

среду при работе промышленных предприятий и транспорта, может быть непосредственно и эффективно преобразована в электроэнергию. $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ характеризуется высокими значениями электропроводности и коэффициента термо-ЭДС и низкой теплопроводностью, что обуславливает высокие значения его фактора мощности и показателя термоэлектрической добротности, а также устойчив на воздухе в широком интервале температур.

Термоэлектрические характеристики керамики на основе кобальтита кальция могут быть улучшены за счет применения «растворных» методов синтеза, использования специальных методик спекания (горячего прессования либо плазменно-искрового спекания), путем частичного замещения ионов кальция или ионов кобальта, а также за счет создания в керамике химической либо фазовой неоднородности. В керамике на основе $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ фазовая неоднородность может быть создана различными способами: введением второй фазы в шихту на стадии синтеза или спекания, варьированием катионной стехиометрии исходной смеси с целью выхода за пределы области гомогенности фазы $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ (согласно [1], на воздухе слоистый кобальтит кальция может существовать в области составов $\text{Ca}_3\text{Co}_{3,87}\text{O}_{9+\delta}$ – $\text{Ca}_3\text{Co}_{4,07}\text{O}_{9+\delta}$), а также отжигом керамики при температурах, превышающих температуру перитектоидного распада $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ ($T_{\text{п}} = 926 \text{ }^\circ\text{C}$ [1]).

Целью настоящей работы являлось повышение термоэлектрических характеристик керамики на основе слоистого кобальтита кальция $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ путем получения более плотных образцов (за счет спекания при температуре выше температуры перитектоидного распада), а также за счет создания в ней фазовой неоднородности (путем варьирования состава с выходом за пределы области гомогенности). Для достижения поставленной цели керамическим методом из оксида кобальта (II, III) и карбоната кальция на воздухе при температуре 1073 в течение 12 часов были синтезированы образцы $\text{Ca}_{3-x}\text{Co}_{4-y}\text{O}_{9+\delta}$ ($x, y = 0, 0.2, 0.4, 0.6$), затем после перетира и прессования образцы обжигали на воздухе при температурах 1473 К (24 ч), 973 К (8 ч), 1173 К (36 ч). При нагревании выше 1199 К кобальтит кальция $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ подвергается перитектоидному распаду [2], а затем при температуре выше 1299 К происходит перитектоидный распад продукта первичного распада [2]. Таким образом, керамика, спеченная при температуре 1473 К получается более плотной, но содержит значительное количество низкопроводящих фаз [3]. Поэтому для восстановления фазы $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ образцы подвергаются длительному низкотемпературному отжигу [3].

Согласно данным электронной микроскопии, проведенной на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM – 5610LV (Япония), керамика на основе кобальтита кальция имеют слоистую структуру. На электронных микрофотографиях составов $\text{Ca}_{2,8}\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ и $\text{Ca}_3\text{Co}_{3,8}\text{O}_{9+\delta}$ хорошо заметны кристаллиты в виде «чешуек», размер которых составляет 10–20 мкм, и ориентированы они преимущественно перпендикулярно оси прессования, что указывает на частичное текстурирование полученной керамики. Для остальных образцов слоистая структура менее выражена. На микрофотографиях состава $\text{Ca}_3\text{Co}_{3,4}\text{O}_{9+\delta}$ хорошо заметна фазовая неоднородность образца.

Как видно из таблицы, наибольшее значение кажущейся плотности, определенной по массе и геометрическим размерам образцов, наблюдалось для стехиометричного состава (88 % от рентгенографической [4], что гораздо больше, чем кажущаяся плотность образцов керамики того же состава, спеченного по традиционной технологии [5]). Плотность остальных образцов ниже, из чего можно сделать вывод, что создание в образцах фазовой неоднородности приводит к ухудшению спекаемости керамики.

Значения открытой пористости образцов ($P_{\text{откр}}$), определенной по водопоглощению, составляли всего 3–5 % (таблица). Таким образом, спекание образцов выше температуры перитектоидного разложения позволяет получить низкопористую керамику.

Таблица – Значения кажущейся плотности, открытой пористости, удельной электропроводности, коэффициента термо-ЭДС и фактора мощности образцов керамики на основе слоистого кобальтита кальция

Образец	$\rho_{\text{эсп}}, \text{ г/см}^3$	$P_{\text{откр}}, \%$	$\sigma_{1050}, \text{ См/см}$	$S_{1050}, \text{ мкВ/К}$	$P_{1050}, \text{ мкВт/(м} \cdot \text{К}^2)$
$\text{Ca}_{2,4}\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$	3,98	5	59,0	137	111
$\text{Ca}_{2,6}\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$	3,84	5	22,0	151	50,0
$\text{Ca}_{2,8}\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$	3,73	–	25,9	235	143
$\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$	4,13	3	33,5	165	90,6
$\text{Ca}_3\text{Co}_{3,8}\text{O}_{9+\delta}$	3,77	6	54,6	157	134
$\text{Ca}_3\text{Co}_{3,6}\text{O}_{9+\delta}$	3,89	5	59,9	160	153
$\text{Ca}_3\text{Co}_{3,4}\text{O}_{9+\delta}$	3,84	3	44,2	133	78,0

Удельную электропроводность керамики определяли на воздухе в интервале температур 300–1100 К параллельно и перпендикулярно оси прессования. Перед измерениями электрических свойств на поверхности образцов формировали Ag-электроды путем вжигания серебряной пасты при 1100 К в течение 15 мин. Для всех составов удельная электропроводность керамики, определенная перпендикулярно оси прессования, во всем интервале температур была на 2–10 См/см выше, чем параллельно, что связано с ориентацией

кристаллитов преимущественно перпендикулярно оси прессования. Электропроводность образцов (за исключением состава $\text{Ca}_{2,8}\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$), в целом, носила металлический характер (то есть с ростом температуры наблюдалось некоторое уменьшение электропроводности). Электропроводность образцов увеличивается с ростом сверхстехиометрического содержания кальция и кобальта в образцах. Наибольшее значение электропроводности наблюдалось для составов $\text{Ca}_{2,4}\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$, $\text{Ca}_3\text{Co}_{3,8}\text{O}_{9+\delta}$ и $\text{Ca}_3\text{Co}_{3,6}\text{O}_{9+\delta}$. Удельная электропроводность образца $\text{Ca}_3\text{Co}_{3,6}\text{O}_9$, измеренная перпендикулярно оси прессования, при комнатной температуре составила 64 См/см, что в 1,8 раза выше значения удельной электропроводности для стехиометрического состава $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$. Таким образом, создание в кобальтите кальция фазовой неоднородности приводит к росту удельной электропроводности.

Коэффициент термо-ЭДС образцов, определяемый на воздухе в интервале температур 300–1100 К относительно серебра, во всем исследованном интервале температур был положительным, это говорит о том, что исследованные нами кобальтиты кальция являются проводниками *p*-типа. Температурная зависимость коэффициента Зеебека для всех исследуемых составов проходила через максимум вблизи 800–1000 К. Наибольшее значение коэффициента термо-ЭДС наблюдалось для образца состава $\text{Ca}_{2,8}\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ и составило 245 мкВ/К при $T = 900$ К, что в 1,4 раза выше, чем для стехиометричного состава при той же температуре. Значения коэффициента термо-ЭДС образцов $\text{Ca}_{2,4}\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ были ниже, чем для $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$, а для всех остальных образцов (за исключением состава $\text{Ca}_{2,8}\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$) были близки к таковым.

Рост электропроводности образцов $\text{Ca}_3\text{Co}_{3,6}\text{O}_{9+\delta}$, $\text{Ca}_3\text{Co}_{3,8}\text{O}_{9+\delta}$, $\text{Ca}_{2,4}\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ и $\text{Ca}_3\text{Co}_{3,4}\text{O}_{9+\delta}$ привел к закономерному росту фактора мощности керамики, вычисленного по формуле $P = S^2 \cdot \sigma$, где S – коэффициент термо-ЭДС, а σ – удельная электропроводность. Температурная зависимость фактора мощности повторяла температурную зависимость коэффициента термо-ЭДС. Наибольшим значением фактора мощности обладала керамика состава $\text{Ca}_3\text{Co}_{3,6}\text{O}_{9+\delta}$ и $\text{Ca}_3\text{Co}_{3,8}\text{O}_{9+\delta}$ вблизи 900 К (около 180 мкВт/(м·К²), что в 1,7 раза больше, чем для стехиометрического состава при той же температуре). При 1050 К, как видно из таблицы, наибольшее значение фактора мощности наблюдается для состава $\text{Ca}_3\text{Co}_{3,6}\text{O}_{9+\delta}$.

Таким образом, достигнуто значительное улучшение термоэлектрических характеристик образцов кобальтита кальция (фактор мощности образцов возрос в 1,7 раза) за счет создания в керамике фазовой неоднородности. Показано, что спекание образцов при температурах выше температуры перитектоидного распада позволяет получить высокоплотную керамику на основе слоистого кобальтита кальция.

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограммы «Материаловедение и технологии материалов».

Список литературы

1. Phase equilibria in Ca–Co–O system / D. Sedmidubsky [et al.] // J. Solid State Chem. – 2012. – Vol. 194. – P. 199–205.
2. Woermann, E. Phase equilibria in the system CaO–cobalt oxide in air / E. Woermann, A. Muan // J. Inorg. Nucl. Chem. – 1970. – V. 32. – P. 1455–1459.
3. Post-calcination, a novel method to synthesize cobalt oxide-based thermoelectric materials / M.-G. Kang [et al.] // Acta Materialia. – 2014. – V. 73. – P. 251–258.
4. Preparation of high-performance $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ thermoelectric ceramics produced by a new two-step method / M. A. Madre [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. – 2013. – Vol. 33. – P. 1747–1754.
5. Чижова, Е. А. Термоэлектрические свойства слоистого кобальтита кальция, модифицированного оксидами кобальта и меди / Е. А. Чижова, С. В. Шевченко // Свиридовские чтения : сб. ст. – Минск, 2019. – Вып. 15. – С. 139–146.

The ceramics of $\text{Ca}_{3-x}\text{Co}_{4-y}\text{O}_{9+\delta}$ ($x, y = 0, 0.2, 0.4, 0.6$) composition was synthesized by solid state reaction method, the influence of its composition and thermal prehistory on thermoelectric properties was studied. It has been established that sintering ceramics at a temperature above the temperature of peritectoid decomposition, followed by prolonged low-temperature annealing, leads to a significant increase of the density of ceramics. The creation of phase inhomogeneity in ceramics makes it possible to obtain materials with improved thermoelectric characteristics.

Латыпов Роман Салаватович, студент 3-го курса факультета химической технологии и техники (специальность «Химическая технология неорганических веществ, материалов и изделий») Белорусского государственного технологического университета, Минск, Беларусь, korbon91@gmail.com.

Научные руководители – *Клындюк Андрей Иванович*, кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры физической, коллоидной и аналитической химии Белорусского государственного технологического университета, Минск, Беларусь, klyndyuk@belstu.by.

Чижова Екатерина Анатольевна, кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры физической, коллоидной и аналитической химии Белорусского государственного технологического университета; Минск, Беларусь, kato_@rambler.ru.

Н. В. ЛАХМИЦКИЙ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОКИСЛЕНИЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ АЛМАЗОВ
ДЕТОНАЦИОННОГО СИНТЕЗА ПРИ ОТЖИГЕ НА ВОЗДУХЕ**

Исследовано влияние температуры и длительности отжига на структуру и функциональный состав поверхности ультрадисперсных алмазов детонационного синтеза (УДА). Установлено что процесс окисления УДА разделяется на 2 этапа, на первом этапе происходит десорбция воды и снижении доли sp^2 -гибритизированного углерода, на втором этапе происходит аморфизация поверхности.

Благодаря своим уникальным свойствам, такими как малые размеры (единицы нм), развитая поверхность ($200\text{--}400\text{ м}^2/\text{г}$) и возможность её направленной функционализации УДА нашли широкое применение в нанотехнологиях, биологии и медицине [1]. В работе [2] собраны последние достижения в применении УДА для диагностики заболеваний и адресной доставки лекарств в организм человека. Данное направление считается наиболее перспективным. В мире уже налажено промышленное производство ультрадисперсных алмазов методом детонационного синтеза. Тем не менее, на пути дальнейшего расширения областей практического приложения наноалмазов имеется ряд нерешенных проблем. Поскольку характеристики материала у разных производителей заметно различаются, основная проблема в использовании УДА – унификация технологии очистки исходных порошков и монофункционализации их поверхности. В настоящее время одним из наиболее распространенных методов очистки и унификации поверхности наноалмазов является их отжиг с окислением на воздухе. В научной литературе [2] вне зависимости от характеристик исходного материала указывается, что оптимальный температурный интервал отжига УДА на воздухе составляет $425\text{--}450\text{ °C}$ при длительности в 5 часов, при этом данные о кинетике окисления наноалмазов, как правило, отсутствуют. Однако, поскольку у разных производителей структура и функциональный состав поверхности УДА отличаются, должны различаться и кинетики окисления наноалмазов. Отсюда следует, что для каждой марки наноалмазов должны быть свои оптимальные параметры отжига.

Цель работы – исследование процессов окисления порошков производства НП ЗАО «Синта» (Минск, Беларусь) [3].

Методика эксперимента. В качестве исходного материала использовался порошок марки УДА-ГО-СП [3]. Отжиг производился в муфельной печи СНОЛ1,6 (Литва) в температурном интервале $425\text{--}450\text{ °C}$. Длительность обработки варьировалась от 20 минут до 15 часов. Потеря массы УДА определялись методом термogrавиметрического анализа. Изменения функционального состава поверхности наноалмазов определялся методом ИК-спектроскопии. Спектры ИК поглощения регистрировались с помощью Фурье-спектрометра Vertex 70 (Bruker, Германия). Изменение структуры УДА исследовалось методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР) с использованием микро Рамановского спектрометра Nanofinder (LOTIS ТП, Беларусь)

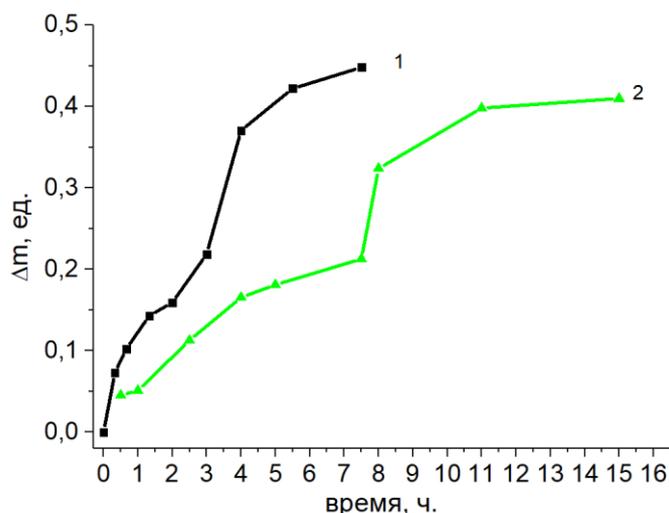


Рисунок 1 – Зависимость потери массы УДА от времени отжига при различных температурах:
1) $T = 450\text{ °C}$; 2) $T = 425\text{ °C}$

Результаты и обсуждение. На рисунке 1 приведены кинетики потери массы УДА при различных температурах. Потеря массы при большей температуре происходит более интенсивно, но при этом сохраняется форма кинетики, что говорит о схожести процессов окисления. Для обеих зависимостей наблюдается перегиб в интервале потери массы 15–20 %. Данный перегиб свидетельствует о двух этапах окисления УДА.

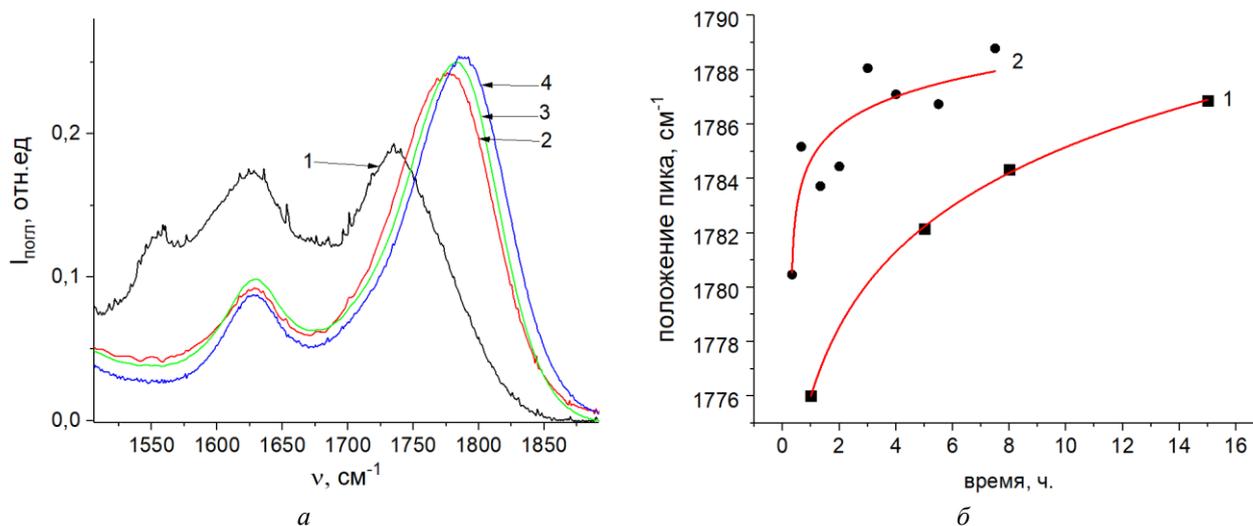


Рисунок 2 – а) характер изменения спектров ИК поглощения с увеличением длительности отжига при $T = 425^\circ\text{C}$: 1) исходный образец, 2) 1 час, 3) 5 часов, 4) 15 часов; б) зависимость положения пика $1775\text{--}1790\text{ cm}^{-1}$ от времени отжига: $T = 425^\circ\text{C}$ (1), $T = 450^\circ\text{C}$ (2)

На рисунке 2а приведены спектры ИК поглощения в диапазоне $1500\text{--}1900\text{ cm}^{-1}$. Полная интерпретация полос представлена в работе [4]. Для исходного спектра наблюдается 3 полосы поглощения на 1555 cm^{-1} , 1627 cm^{-1} , 1736 cm^{-1} . Полоса 1627 cm^{-1} соответствует колебаниям гидроксильной группы (адсорбированная влага). Полоса 1736 cm^{-1} наблюдаемая в исходном образце соответствует валентным колебаниям связи $\text{C}=\text{O}$ в карбоксильных группах. Полоса 1555 cm^{-1} соответствует колебаниям ионизированной карбоксильной группы COO^- . Сразу поле отжига обнаружено исчезновение полосы 1555 cm^{-1} . Фиксируется снижение поглощения линии 1627 cm^{-1} . Уменьшение поглощения данной линии объясняется десорбцией воды в процессе отжига. В результате отжига полоса колебаний связи $\text{C}=\text{O}$ смещается в сторону больших волновых чисел вплоть до 1790 cm^{-1} . Это может объясняться трансформацией карбоксильных групп в форму лактонов и/или ангидридов карбоновых кислот в результате окисления на воздухе. На рисунке 2б приведена зависимость положения максимума данной полосы поглощения от времени отжига для всех исследованных образцов. Видно, что с ростом температуры и длительности отжига наблюдается смещение линии колебаний группы $\text{C}=\text{O}$ в сторону больших волновых чисел.

Результаты исследвались методом КР и представлены на рисунке 3. Для исходного образца спектр КР может быть представлен в виде суперпозиции пяти функций Лоренца с максимумами около 1230 , 1322 , 1420 , 1556 и 1620 cm^{-1} . Полоса 1322 cm^{-1} представляет собой колебания атомов углерода в решетке алмаза. Полоса 1420 cm^{-1} может быть отнесена к фрагментам со структурой транс-полиацетилена на поверхности наночастиц. Полоса 1556 cm^{-1} соответствует колебаниям скелета в углеродных кольцах и/или углеродных цепочках с sp^2 связями. Полоса 1620 cm^{-1} может соответствовать колебаниям группы OH молекулы воды.

Для обеих температур отжига с ростом длительности обработки наблюдается немонотонное изменение интенсивности полос 1420 и 1556 cm^{-1} , соответствующих колебаниям sp^2 -связанного углерода (рис. 3б,в). Минимум содержания sp^2 -связей на поверхности частиц УДА согласуется с точками перегиба термогравиметрических кривых (рис. 1).

Из приведенных выше экспериментальных данных следует, что процесс окисления УДА на воздухе можно разделить на 2 стадии. На первой стадии происходит десорбция воды, удаление неалмазного углерода и трансформация кислородосодержащих групп в форму ангидридов. На второй стадии согласно данным спектроскопии КР и термогравиметрической кривой (рис. 1) начинается повторная аморфизация поверхности наноалмазов что. Данный процесс требует дальнейших исследований.

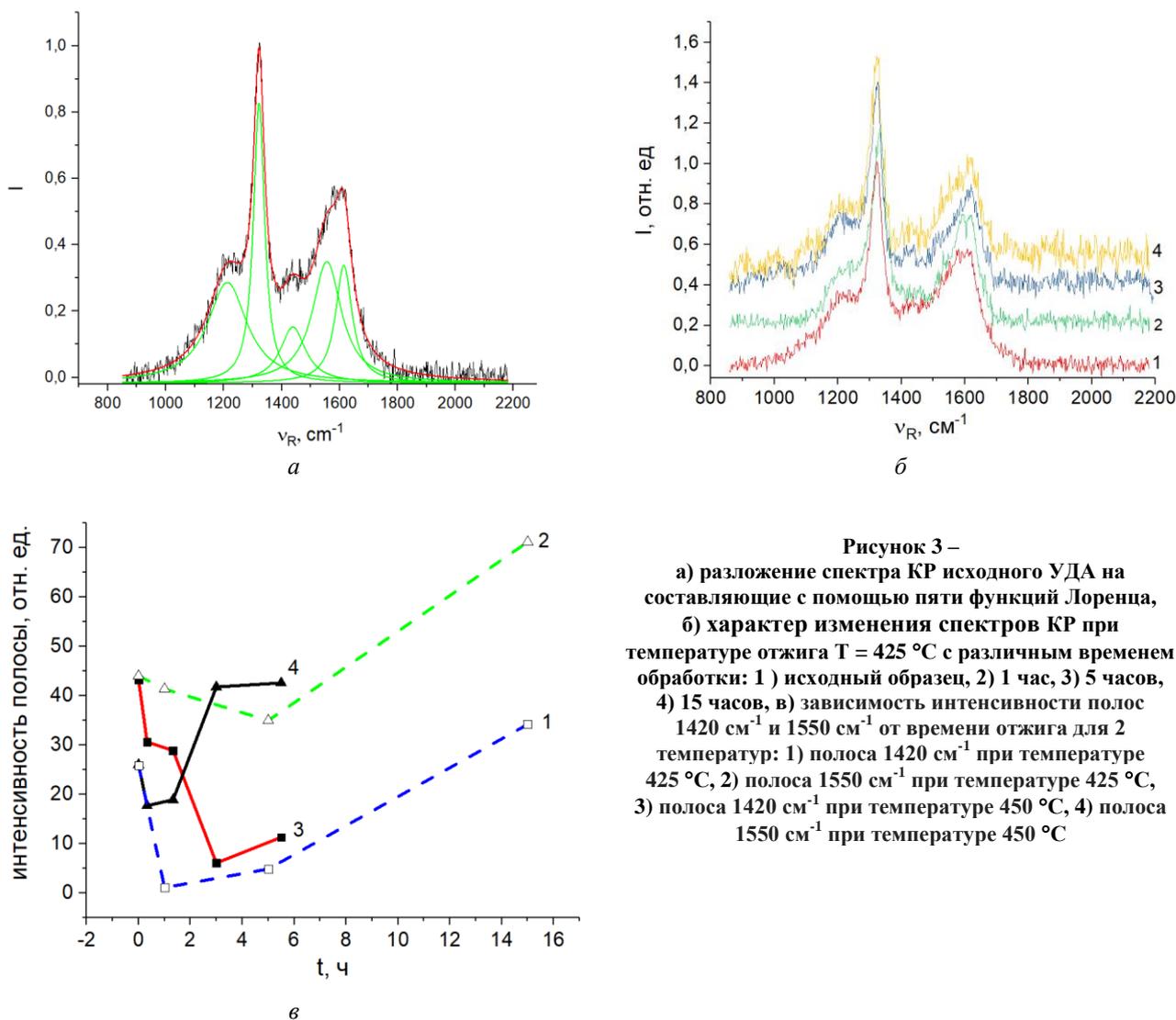


Рисунок 3 –
а) разложение спектра КР исходного УДА на составляющие с помощью пяти функций Лоренца,
б) характер изменения спектров КР при температуре отжига $T = 425 \text{ }^\circ\text{C}$ с различным временем обработки: 1) исходный образец, 2) 1 час, 3) 5 часов, 4) 15 часов, **в)** зависимость интенсивности полос 1420 cm^{-1} и 1550 cm^{-1} от времени отжига для 2 температур: 1) полоса 1420 cm^{-1} при температуре $425 \text{ }^\circ\text{C}$, 2) полоса 1550 cm^{-1} при температуре $425 \text{ }^\circ\text{C}$, 3) полоса 1420 cm^{-1} при температуре $450 \text{ }^\circ\text{C}$, 4) полоса 1550 cm^{-1} при температуре $450 \text{ }^\circ\text{C}$

Список литературы

1. Долматов, В. Ю. Детонационные нанодIAMAZы: синтез, строение, свойства и применение / В. Ю. Долматов // Успехи химии. – 2007. – № 76 (4). – С. 386–395.
2. Turcheniuk, K. Biomedical applications of nanodiamonds (Review) / K. Turcheniuk, Vadym N. Mochalin // IOP Publishing. – 2017. – № 5.
3. Control of sp^2/sp^3 Carbon Ratio and Surface Chemistry of Nanodiamond Powders by Selective Oxidation in Air / Sebastian Osswald [et al.].
4. <http://sinta.biz/nanoalmazы>
5. Tristan, Petit. FTIR spectroscopy of nanodiamonds: Methods and interpretation / Tristan Petit, Ljiljana Puskar // Diamonds & Related Materials.

The influence of temperature and annealing duration on the structure and functional composition of the surface of ultrafine detonation synthesis diamonds (UDD) is studied. It has been established that the oxidation of UDD is divided into 2 stages, at the first stage, water is desorbed and the fraction of sp^2 hybridized carbon decreases, at the second stage, surface amorphization occurs.

Лахмицкий Никита Васильевич, студент физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, nikita7828@gmail.com.

Научный руководитель – *Гусаков Григорий Анатольевич*, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник НИИ ПФП им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, gga68@rambler.ru.

Ю. В. ЛЕВЧЕНКО, А. В. ХОРОЛЬСКИЙ

ЭФФЕКТИВНЫЕ РАДИУСЫ МАКРОМОЛЕКУЛ БЫЧЬЕГО СЫВОРОТОЧНОГО АЛЬБУМИНА, РАССЧИТАННЫЕ ПО ДАННЫМ О СДВИГОВОЙ ВЯЗКОСТИ ЕГО ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

С помощью ячеечного подхода Маломужа – Орлова из экспериментальных данных по сдвиговой вязкости растворов бычьего сывороточного альбумина рассчитаны эффективные радиусы биомолекул в интервале концентраций 2,0–27,2 масс. % и температур 278–318 К при постоянном значении рН = 5,2.

Важной характеристикой макромолекул глобулярных белков у разбавленных растворах является их гидродинамический радиус. Изменение гидродинамического радиуса позволяет отслеживать изменения внутренней структуры макромолекул в растворе в зависимости от температуры, концентрации и показателя кислотно-щелочного баланса среды (рН). Для определения гидродинамического радиуса используются разные физико-химические методы: фотонная корреляционная спектроскопия, дифракция рентгеновских лучей, малоугловое рассеивание нейтронов, ЯМР-спектроскопия с импульсным градиентом магнитного поля, капиллярная вискозиметрия. Вследствие многофакторности влияния на структуру макромолекул белка (концентрация, температура, кислотно-щелочной баланс, присутствие солей, денатурантов, и т. п.) и отличий в физических подходах экспериментальных методов исследования, возникают различия в определении величины гидродинамического радиуса макромолекул в растворе.

Настоящая работа посвящена обсуждению результатов моделирования эффективного радиуса макромолекул бычьего сывороточного альбумина (БСА) в зависимости от температуры и концентрации. Определение эффективного радиуса производится путем обработки экспериментальных данных сдвиговой вязкости с помощью формулы Бетчелора [1] для достаточно разбавленных растворов и формулы Маломужа – Орлова [2; 3] для концентрированных растворов. Внимательное исследование зависимости эффективных радиусов макромолекул в зависимости от температуры, концентрации и кислотно-щелочного баланса водной среды имеет первоочередное значение для определения характера перестроек внутренней структуры макромолекул и особенностей процессов олигомеризации в жидкой системе.

Методом капиллярной вискозиметрии в работе [4] экспериментально исследована сдвиговая вязкость растворов БСА в интервале концентраций 1,76–36,34 масс. % и температур 278–318 К при постоянном значении рН = 5,2, которое находится в окрестностях изоэлектрической точки БСА. Для расчетов эффективных радиусов макромолекул из данных о сдвиговой вязкости в диапазоне объемных концентраций $0,2 \leq \varphi \leq 0,5$ использована формула Маломужа – Орлова, теоретическое обоснование которой проведено в работах [2; 3]. Формула Маломужа – Орлова получена с использованием ячеечного подхода, который учитывает вращательные степени свободы частицы. Методика использования алгоритма Маломужа – Орлова описана в работе [5]. Этот подход позволяет описать поведение растворов макромолекул в интервале объемных концентраций $\varphi \leq 0,5$, верхняя граница которого совпадает с плотностью раствора при контакте всех макромолекул [2; 3; 5].

При уровне кислотно-щелочного баланса 5,2 макромолекула БСА свернута в компактную конформацию сердцевидной формы (N-изоформа), поэтому правомерно использовать подход Маломужа – Орлова для расчета эффективных радиусов биомолекул. Для этого перейдем от массовой концентрации раствора к объемной концентрации. Вследствие этого указанный алгоритм был использован для интервала массовых концентраций 2,0–27,2 масс. %, что соответствует интервалу объемных концентраций макромолекул 0,04–0,49. Путем обработки экспериментальных данных с помощью алгоритма Маломужа – Орлова получены концентрационные зависимости эффективных радиусов макромолекул БСА вдоль изотерм для его водных растворов (рис. 1).

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что во всем температурном интервале вплоть до концентраций ~5 масс. % наблюдается быстрое нелинейное увеличение эффективных радиусов макромолекул БСА. Отметим наличие максимумов эффективных радиусов макромолекул БСА при концентрации 5 масс. %, положение которых практически не зависит от температуры: при 278 К эффективный радиус БСА равен 43,50 Å, а при 318 К – 42,55 Å. В интервале концентраций 5,0–27,2 масс. % наблюдается уменьшение размеров макромолекулы БСА, причем при концентрациях ≥ 10 масс. % зависимость носит линейный характер [6].

Ранее в работе [7] нами исследованы эффективные радиусы макромолекул сывороточного альбумина человека (САЧ) из данных о сдвиговой вязкости его водных растворов при постоянном значении рН = 7,0 (близко к естественному рН крови человека) в интервале концентраций 0,82–36,9 масс. % и температурном интервале 278–318 К. Установлено, что во всем температурном интервале до концентраций 3,7 масс. % эффективные радиусы САЧ остаются неизменными в пределах погрешностей моделирования: наблюдается «плато» эффективных радиусов макромолекул САЧ в области относительно низких концентраций белка. Для

БСА же в окрестностях изоэлектрической точки наблюдается другая закономерность: в разбавленных растворах БСА с ростом концентрации видим рост эффективных радиусов белка. Схожими чертами температурно-концентрационных зависимостей эффективных радиусов БСА и САЧ являются следующие результаты: 1) эффективные радиусы этих макромолекул при концентрациях ≥ 10 масс. % остаются почти независимыми от температуры; 2) максимальные эффективные радиусы САЧ (44 Å) и БСА (43,5 Å) практически равны. Напомним, что макромолекулы САЧ и БСА имеют похожую на 75,52 % последовательность нуклеотидов в макромолекулярной цепи, что обуславливает подобные пространственные структуры этих белков.

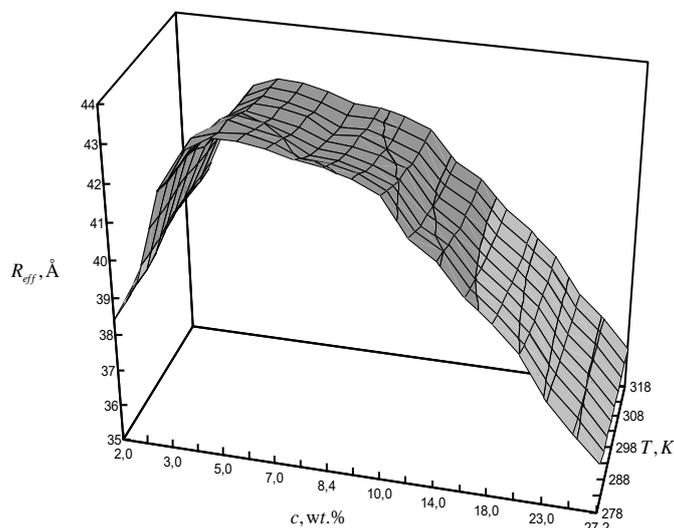


Рисунок 1 – Температурно-концентрационная зависимость эффективных радиусов макромолекул бычьего сывороточного альбумина при pH = 5,2

Сравнение указанных результатов с величинами гидродинамических радиусов БСА, полученных из экспериментальных данных о коэффициенте самодиффузии макромолекул в растворе, свидетельствует в пользу хорошей корреляции полученных величин [6]. При этом следует отметить, что обоснование некоторых несоответствий и расхождений в результатах, полученных разными экспериментальными методами, требует дальнейших системных исследований.

Таким образом, определение радиусов макромолекул из данных о сдвиговой вязкости их растворов с помощью формулы Маломужа – Орлова представляется достаточно простым и эффективным методом. Экспериментальная доступность метода капиллярной вискозиметрии и возможность оперативного изменения состава раствора в процессе исследования позволяют получить картину изменения размеров макромолекул в зависимости от температуры, концентрации, кислотно-щелочного баланса, ионного состава раствора, что предельно важно для понимания особенностей сложной динамики биомacroмолекул в водных растворах.

Список литературы

1. Batchelor, G. K. An Introduction to Fluid Dynamics / G. K. Batchelor. – Cambridge University Press : Cambridge Mathematical Library series, 2000 [1967]. – XXX p.
2. Malomuzh, N. P. Static shear viscosity of a bimodal suspension / N. P. Malomuzh, E. V. Orlov // Ukrainian Journal of Physics. – 2005. – Vol. 50, iss. 6. – P. 618–622.
3. Orlov, E. V. Shear viscosity of dispersions of particles with liquid shells / E. V. Orlov // Colloid Journal. – 2010. – Vol. 72. – P. 820–824.
4. Monkos, K. Viscosity of bovine serum albumin aqueous solutions as a function of temperature and concentration / K. Monkos // International Journal of Biological Macromolecules. – 1996. – Vol. 18. – P. 61–68.
5. Khorolskiy, O. V. Effective radii of macromolecules in dilute polyvinyl alcohol solutions / O. V. Khorolskiy // Ukrainian Journal of Physics. – 2018. – Vol. 63, iss. 2. – P. 144–149.
6. Khorolskiy, O. V. Calculation of the macromolecular size of bovine serum albumin from the viscosity of its aqueous solutions / O. V. Khorolskiy, Yu.D. Moskalenko // Ukrainian Journal of Physics. – 2020. – Vol. 65, iss. 1. – P. 41–49.
7. Khorolskiy, O. V. Calculation of the effective macromolecular radii of human serum albumin from the shear viscosity data for its aqueous solutions / O. V. Khorolskiy // Ukrainian Journal of Physics. – 2019. – Vol. 64, iss. 4. – P. 285–290.

On the basis of experimental data for the shear viscosity of aqueous bovine serum albumin solutions and in the framework of the Malomuzh – Orlov cellular approach, effective radii of bovine serum albumin has been calculated for the constant pH = 5,2 in the concentration interval of 2,0–27,2 wt. % and the temperature interval of 278–318 K.

Левченко Юлия Викторовна, студентка физико-математического факультета Полтавского национального педагогического университета имени В. Г. Короленко, Полтава, Украина, rpru20@gmail.com.

Научный руководитель – Хорольский Алексей Викторович, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель Полтавского национального педагогического университета имени В. Г. Короленко, Полтава, Украина, khorolskiy.alexey@gmail.com.

УДК 577.346:577.352.333

Ю. А. ЛЫЧАГИНА

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА НОВОГО ДИКАРБОЦИАНИНОВОГО КРАСИТЕЛЯ, МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОЛИЭТИЛЕНГЛИКОЛЕМ

Исследованы спектры поглощения и флуоресценции нового производного тиофлавина Т, дикарбоцианинового красителя, модифицированного полиэтиленгликолем, в растворителях различной полярности и вязкости и в присутствии белка бычьего сывороточного альбумина и амилоидных фибрилл из инсулина. Установлена высокая специфичность нового красителя к амилоидным фибриллам.

Красители, у которых после поглощения света происходит поворот одного фрагмента молекулы относительно другого, сопровождаемый внутримолекулярным переносом заряда, получили название молекулярных роторов (МР). МР рассматриваются, как перспективные зонды для определения вязкости жидкостей, в особенности в локально малых объемах (мембраны, клетки, капилляры кровеносных сосудов). Возможность управления внутримолекулярным движением может быть использована для построения устройств, имеющих нанометровые размеры, – молекулярных моторов или молекулярных машин. Молекулярные роторы являются наиболее чувствительными флуоресцентными зондами для детекции и исследования амилоидных фибрилл (АФ) и других упорядоченных белковых агрегатов, которые считаются ключевым фактором в этиологии целого ряда конформационных болезней, включая болезни Альцгеймера, Паркинсона и др. Классическим флуоресцентным маркером амилоидов является бензотиазольный краситель Тиофлавин Т, который образует с фибриллами интенсивно флуоресцирующий комплекс. Тиофлавин Т практически не флуоресцирует в воде и других маловязких растворителях, однако его квантовый выход увеличивается на три порядка при наличии в растворе АФ. Кроме того, присутствие в растворе белков в нативной или даже денатурированной форме практически не влияет на интенсивность его флуоресценции. Однако, этот маркер имеет ряд недостатков, из которых наиболее существенным является поглощение и флуоресценция в сине-зеленой области спектра, что затрудняет его использование для детекции амилоидных фибрилл в тканях. В связи с этим, актуальным является синтез и исследование новых красителей, молекулярных роторов, чувствительных к АФ, но имеющих поглощение и флуоресценцию в длинноволновой области, где поглощение биологических тканей является незначительным.

Данная работа направлена на исследование спектральных свойств нового флуоресцентного дикарбоцианинового красителя, ковалентно связанного с полиэтиленгликолем (Th-C8), в растворителях различной полярности и вязкости (H₂O, глицерин, диоксан) и определение возможности его использования для детекции и исследования амилоидных фибрилл, а также белков и их комплексов.



Рисунок 1 – Структурная схема тиофлавина Т (а) и дикарбоцианинового красителя, модифицированного полиэтиленгликолем (Th-C8, б).

Результаты исследований спектров поглощения и флуоресценции представлены на рисунке 2а, б. Видно, что положение спектра поглощения является чувствительным к полярности микроокружения: в полярном растворителе (вода) спектр поглощения имеет наиболее коротковолновое положение. В малополярном диоксане и при встраивании в амилоидные фибриллы имеет место значительный bathochromный сдвиг спектра поглощения, составляющий соответственно 15 и 50 нм. Положение спектра флуоресценции практически не

зависит от диэлектрических свойств растворителя. В этом случае чувствительным параметром является интенсивность и квантовый выход флуоресценции. Новый краситель характеризуется чрезвычайно низким квантовым выходом флуоресценции ($\sim 0,0028$) в маловязких полярных растворителях. В малополярных (диоксан), а также вязких растворителях (глицерин) интенсивность свечения значительно увеличивается; квантовый выход соответственно равен 0,0071 и 0,033. Встраивание в амилоидные фибриллы приводит к увеличению квантового выхода примерно в 15 раз. Аналогичные спектральные свойства характерны для бензтиазоловых молекулярных роторов – тиофлавина Т [1; 2] и его стироловых производных [3], используемых для детекции амилоидных фибрилл.

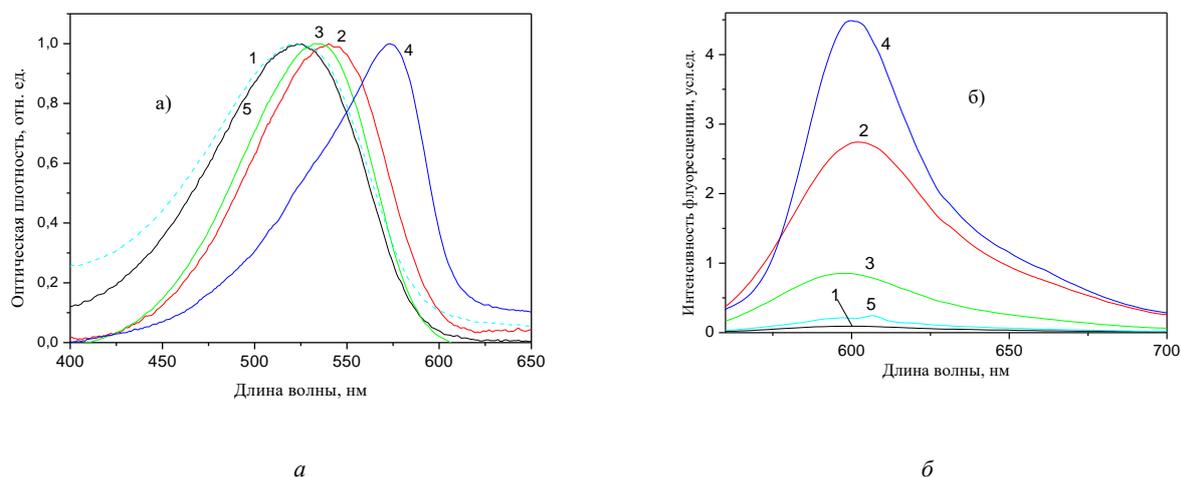


Рисунок 2 – Нормированные спектры поглощения (а) и флуоресценции (б) Th-C8 в воде (1), глицерине (2), диоксане (3), а также в воде в присутствии амилоидных фибрилл (4) и бычьего сывороточного альбумина (БСА) – 5

Установлено, что низкий квантовый выход флуоресценции соединения в маловязких растворителях является результатом торсионного вращения бензтиазолового и аминокбензольного фрагментов молекулы друг относительно друга, в результате которого молекула за время жизни в возбужденном состоянии переходит в скрученное ТИСТ-состояние, которое является нефлуоресцирующим. В вязких растворителях торсионное вращение в значительной степени заторможено, что и приводит к увеличению квантового выхода флуоресценции. Результаты спектральных исследований показывают, что модификация красителя полиэтиленгликолем не изменяет основные его свойства. Th-C8, как и другие бензтиазоловые красители, проявляет свойства молекулярных роторов, для которых характерна зависимость квантового выхода флуоресценции от вязкости растворителя.

Отличительной особенностью исследуемой производной, модифицированной полиэтиленгликолем, является почти полная инертность по отношению к белку бычьему сывороточному альбумину (БСА) и другим белкам в нативной форме. Как видно, из рисунков 1 и 2, присутствие в растворе белка не приводит к изменению спектра поглощения и флуоресценции; интенсивность флуоресценции при этом увеличивается незначительно. Это указывает на то, что данный краситель практически не встраивается в БСА. В связи с этим взаимодействие с амилоидными фибриллами можно рассматривать как достаточно специфическое.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что новый краситель является эффективным флуоресцентным маркером амилоидных фибрилл и может быть использован для их детекции и исследования.

Список литературы

1. Thioflavin T as a Molecular Rotor: Fluorescent Properties of Thioflavin T in Solvents with Different Viscosity / V. I. Stsiapura [et al.] // J. Phys. Chem. B. – 2008. – Vol. 112, № 49. – P. 15893–15902.
2. Маскевич, А. А. Флуоресцентные свойства тиофлавина Т при его встраивании в нативные и денатурированные белки / А. А. Маскевич, С. А. Кургузенков, А. В. Лавыш // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2013. – № 2 (151). – С. 75–85.
3. Aggregation of thioflavin T and its new derivative in the presence of anionic polyelectrolyte / A. V. Lavysh [et al.] // Biointerface Research in Applied Chemistry. – 2016. – Vol. 6, iss. 5. – P. 1525–1530.

The absorption and fluorescence spectra of a new derivative of thioflavin T, a dicarbocyanine dye modified with polyethylene glycol, were studied in a solvent of different polarity and viscosity and in the presence of bovine serum albumin protein and amyloid fibrils from insulin. The high specificity of the new dye to amyloid fibrils has been established.

Лычагина Юлия Александровна, магистрант 1-го года обучения физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

Научный руководитель – Маскевич Александр Александрович, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой общей физики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, amaskevich@grsu.by.

УДК 523.681,533.9.082.5

А. А. МАРТЫНОВА, А. А. ЩУРЕВИЧ, Н. А. ОРЕХОВА

ИССЛЕДОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ГРАНИТОВ КАРЬЕРА МИКАШЕВИЧИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Проведены исследования влияния параметров двояных лазерных импульсов на формирование компонентного состава в лазерной плазме методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектроскопии (ЛАЭМС) образцов гранита карьера Микашевичи. Определены оптимальные параметры лазерных импульсов, а именно энергии и интервала между двояными лазерными импульсами, обеспечивающими максимальную чувствительность анализа.

Летом 2020 года США отправят на Красную планету марсоход, оснащенный мощным лазером, который сможет выжигать участки породы для анализа образующейся плазмы при помощи камеры, а звуков испарения – при помощи микрофона. Мощности импульсов лазера Mars 2020 хватит, чтобы при температуре до 10 000 °С выжигать точечные отверстия в минералах/породах на расстоянии до семи метров. Использование лазера поможет операторам миссии определить состав пород, которые находятся вне досягаемости шупа ровера или там, куда ему будет сложно забраться. Лазер позволит проанализировать цель, прежде чем ехать к ней. Предварительный анализ также отсеет породы, которые не подходят для керновых проб: их число ограничено. Особый интерес представляют также минералы, которые образуются в присутствии жидкой воды, такие как глины, карбонаты и сульфаты. Жидкая вода необходима для существования жизни, какой мы ее знаем, включая окаменелости оставшиеся от возможной микробной жизни, которые могли жить на Марсе миллиарды лет назад.

Марс является *планетой земного типа* и состоит из каменных пород с примесью *железа*. Как и в случае Земли, на раннем этапе эволюции произошло расслоение на железное *ядро* и силикатную *мантию*, затем образование *коры* толщиной в среднем 50 км. 7 октября 2012 года марсоход «Кьюриосити» выполнил первый рентгеновский дифракционный анализ марсианских пород. Результаты выявили наличие ряда минералов, включая полевые шпаты, пироксены и оливин; было выдвинуто предположение о том, что почва Марса аналогична выветренным базальтам вулканов на Гавайях. В июле 2015 года марсоход определил наличие тримита в каменном образце из кратера Гейл. Сверху планета покрыта мелкодисперсной пылью – оксидом железа, который придает ей красный оттенок. Под этим слоем располагаются базальтовые породы [1].

Цель работы состояла в том, чтобы показать возможность и определить оптимальные условия для получения методом абляции сериями двояных лазерных импульсов данных по химическому составу образцов гранитов карьера Микашевичи, аналогичных марсианским.

Для получения снимков образцов гранита использовали взб-камеру и цифровой оптический микроскоп Webbers со светодиодной подсветкой и, совмещенный с цифровой камерой (отраженный свет). Полученные снимки приведены на рис. 1.



а



б

Рисунок 1 – Снимки поверхности гранита: а – общий вид образца (взб-камера); б – увеличенный участок образца (цифровой микроскоп WEBBERS F2n, увеличение $\times 50$)

Анализ и целенаправленное повышение чувствительности спектрального анализа природных материалов методом лазерной искровой спектроскопии возможно на основе воздействия на первичную плазму дополнительного лазерного излучения. При двухимпульсном лазерном воздействии при различных углах

падения луча на мишень и плазму возможно одновременное проведение высокочувствительного спектрального анализа, контроля концентрации возбужденных и заряженных частиц плазмы.

Для проведения исследований использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1 (изготовитель СП «ЛОТИС ТИИ»). Лазер может работать с частотой повторения импульсов до 10 Гц на длине волны 1064 нм. Длительность импульсов ≈ 15 нс. Временной сдвиг между сдвоенными импульсами может меняться от 0 до 100 мкс с шагом 1 мкс. Размер сфокусированного пятна примерно 50 мкм, при фокусном расстоянии объектива 104 мм.

На рис. 2 представлена зависимость интенсивности линий кальция Ca II (396,847 нм), алюминия Al I (396,153 нм), железа Fe I (404,587 нм), магния Mg I (383,826 нм), кремния Si II (413,096 нм) и титана Ti II (376,132 нм) в спектрах от энергии, интервала между импульсами и глубины (номер слоя).

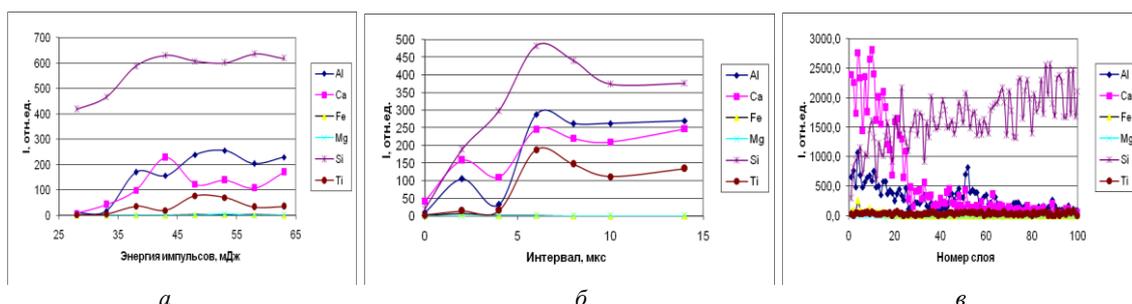


Рисунок 2 – Зависимость интенсивность линий:
а) от энергии импульсов, б) от интервала между импульсами, в) от глубины (номер слоя)

Как видно из полученных данных, при увеличении энергии импульсов интенсивность линий элементов возрастает до энергии, примерно равной 40–45 мДж, а затем рост замедляется. Из результатов, приведенных на рис. 2б, наглядно видно преимущество использования сдвоенных лазерных импульсов. При нулевом интервале между импульсами интенсивность практически всех линий очень мала, хотя энергия импульсов, действующих на образец, удвоенная. Исходя из полученных результатов оптимальными параметрами для анализа являются энергия 40–45 мДж, междуимпульсный интервал – 6–10 мкс.

При использовании энергии импульсов 45 мДж и интервале между импульсами равном 8 мкс проведен анализ изменения содержания элементов от глубины (рис. 2в). Как видно из полученных данных содержание кальция и алюминия в исследованном образце на глубине после 25–30 слоя существенно уменьшается. Это может быть связано с тем фактом, что образец находился на воздухе в течении нескольких лет, в результате в контакте с водой верхний слой образца накопили кальций. При этом видно, что содержание кремния в верхних слоях заметно меньше. По-видимому, при длительном взаимодействии с природной водой поверхность преобразуется, становится более рыхлой.

Полученные результаты можно кратко объяснить следующим образом. Воздействие лазерного излучения большой интенсивности на поверхность твёрдого тела в этом случае происходит посредством абляционного процесса, заключающегося в испарении и ионизации поверхностных слоёв мишени, образовании плотной плазмы высокого давления и, как следствие, возбуждении гидродинамического движения в неиспарившейся части мишени.

При энергии импульсов более 40 мДж воздух, окружающий мишень, настолько сильно нагревается, что сам начинает поглощать падающее излучение и процесс образования плазмы перебрасывается из паров мишени в воздух. Происходит пробой воздуха. В результате образования плазмы начинается рост интенсивности ионной линии азота. При дальнейшем увеличении энергии более 55 мДж воздушная плазма начинает экранировать мишень от падающего ЛИ. Вследствие чего энергозатрат в мишень и эрозионную плазму становится менее эффективным. Интенсивность атомных и ионных линий элементов снижается.

При превышении порога плазмообразования оптическая толщина образующегося при $q > q_4$ плазменного слоя будет возрастать до тех пор, пока в плазме не станет поглощаться заметная часть лазерного излучения. При достаточной плотности потока лазерного излучения нет зависимости от того, является твердое тело сильно или слабо поглощающим. В случае слабо поглощающего материала происходит быстрая ионизация атомов облучаемого вещества и коэффициент поглощения резко возрастает.

Таким образом, выполненные спектроскопические исследования характеристик приповерхностной лазерной плазмы, образуемой при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на образец гранита, позволили определить оптимальные параметры лазерных импульсов (энергию, интервал между импульсами) позволяющими определять полуколичественно содержание основных химических элементов, входящих в состав гранита из карьера Микашевичи.

Список литературы

1. Галанин, А. В. Факторы рельефообразования на Марсе [Электронный ресурс] / А. В. Галанин // Вселенная живая. – Владивосток, 2013. – Режим доступа: <http://ukhtoma.ru/mars13.htm>.

The influence of the parameters of twin laser pulses on the formation of the component composition in laser plasma by laser atomic emission multichannel spectrometry (LAEMS) of samples of granite from the Mikashevichi quarry was studied. The optimal parameters of the laser pulses, namely the energy and the interval between the twin laser pulses that provide the maximum sensitivity of the analysis, are determined.

Мартынова Анастасия Артемовна, ученица 11 класса ГУО «Средняя школа № 64», Минск, Беларусь.

Щуревич Александра Андреевна, ученица 9 класса ГУО «Средняя школа № 64», Минск, Беларусь.

Научные руководители – *Орехова Наталия Андреевна*, учитель астрономии ГУО «Средняя школа № 64», Минск, Беларусь.

Зажогин Анатолий Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра лазерной физики и спектроскопии физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, zajogin_an@mail.ru.

УДК 523.681,533.9.082.5

А. А. МАРТЫНОВА, О. В. ДУБРОВСКАЯ, Н. А. ОРЕХОВА

ИССЛЕДОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ДИОРИТОВ КАРЬЕРА МИКАШЕВИЧИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Проведены исследования влияния параметров сдвоенных лазерных импульсов на формирование компонентного состава в лазерной плазме методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектроскопии (ЛАЭМС) образцов диорита из карьера Микашевичи. Определены оптимальные параметры лазерных импульсов, а именно энергии и интервала между сдвоенными лазерными импульсами, обеспечивающими максимальную чувствительность анализа.

Летом 2020 года США отправят на Красную планету марсоход, оснащенный мощным лазером, который сможет выжигать участки породы для анализа образующейся плазмы при помощи камеры, а звуков испарения – при помощи микрофона. Мощности импульсов лазера Mars 2020 хватит, чтобы при температуре до 10 000 °С выжигать точечные отверстия в минералах/породах на расстоянии до семи метров. Использование лазера поможет операторам миссии определить состав пород, которые находятся вне досягаемости шупа ровера или там, куда ему будет сложно забраться. Лазер позволит проанализировать цель, прежде чем ехать к ней. Марс является планетой земного типа и состоит из каменистых пород с примесью железа [1].

Карьер Микашевичи – самый большой гранитный карьер в Европе. Месторождение диорита, гранита, гранодиорита (из этих камней в процессе обработки получается щебень) и других твердых пород – это огромный карьер, размеры которого трудно себе представить. Сейчас он 1860 метров в ширину, 2985 в длину, глубиной 150 метров.

Диорит составляет 78 % от общей массы пород, которые извлекают из земли в этом карьере. Гранит – 13 %, гранодиорит – 8 %. Последний по составу является промежуточным между диоритом и гранитом. Еще 1 % – камни и породы других разновидностей. Диорит – это камень магматического происхождения, как и гранит. Порода формируется на глубинах, рождаясь из магмы при температурах в тысячи градусов. Очень твердый, прочнее железа.

Диорит очень похож на гранит по происхождению и минеральному составу. Он образуется на стыке в том месте, где океаническая плита меняется местами с континентальной. При частичном распаде океанской плиты образуется базальтовая магма, поднимаясь, она проникала в гранитные породы континентальной плиты. В этом месте происходит смешивание базальта и гранита. При кристаллизации этой смеси образуется диорит. Диорит и гранит входят в группу горных пород, которые называются гранитоиды. Но в составе диорита меньше кварца, чем в гранитах, его содержание никогда не превышает 20 %. Если кварца больше, то это уже не диорит, а гранодиорит. Главными минералами являются средний плагиоклаз (андезин или олигоклаз), роговая обманка, реже авгит и биотит, кварц, иногда присутствует калиевый полевой шпат. Акцессорные минералы представлены титанитом, апатитом, магнетитом, ильменитом, цирконом.

Цель работы состояла в том, чтобы показать возможность и определить оптимальные условия для получения методом абляции сериями сдвоенных лазерных импульсов данных по химическому составу образцов диоритов карьера Микашевичи, аналогичных марсианским.

Для получения снимков образцов диорита использовали взб-камеру и цифровой оптический микроскоп Webbers со светодиодной подсветкой и совмещенный с цифровой камерой (отраженный свет). Полученные снимки приведены на рис. 1.



Рисунок 1 – Снимки поверхности диорита: а) и б) общий вид образца (взб-камера), в) увеличенный чёрный участок образца, г) увеличенный светлый участок образца (цифровой микроскоп WEBBERS F2n, увеличение $\times 50$)

Анализ и целенаправленное повышение чувствительности спектрального анализа природных материалов методом лазерной искровой спектрометрии возможны на основе воздействия на первичную плазму дополнительного лазерного излучения. При двухимпульсном лазерном воздействии при различных углах падения луча на мишень и плазму возможно одновременное проведение высокочувствительного спектрального анализа, контроля концентрации возбужденных и заряженных частиц плазмы.

Для проведения исследований использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1 (изготовитель СП «ЛОТИС ТИИ»). Лазер может работать с частотой повторения импульсов до 10 Гц на длине волны 1064 нм. Длительность импульсов ≈ 15 нс. Временной сдвиг между сдвоенными импульсами может меняться от 0 до 100 мкс с шагом 1 мкс. Размер сфокусированного пятна примерно 50 мкм, при фокусном расстоянии объектива 104 мм.

На рис. 2 представлена зависимость интенсивности линий кальция Ca II (396,847 нм), алюминия Al I (396,153 нм), железа Fe I (404,587 нм), магния Mg I (383,826 нм), кремния Si II (413,096 нм) и титана Ti II (376,132 нм) в спектрах от энергии, интервала между импульсами и глубины (номер слоя).

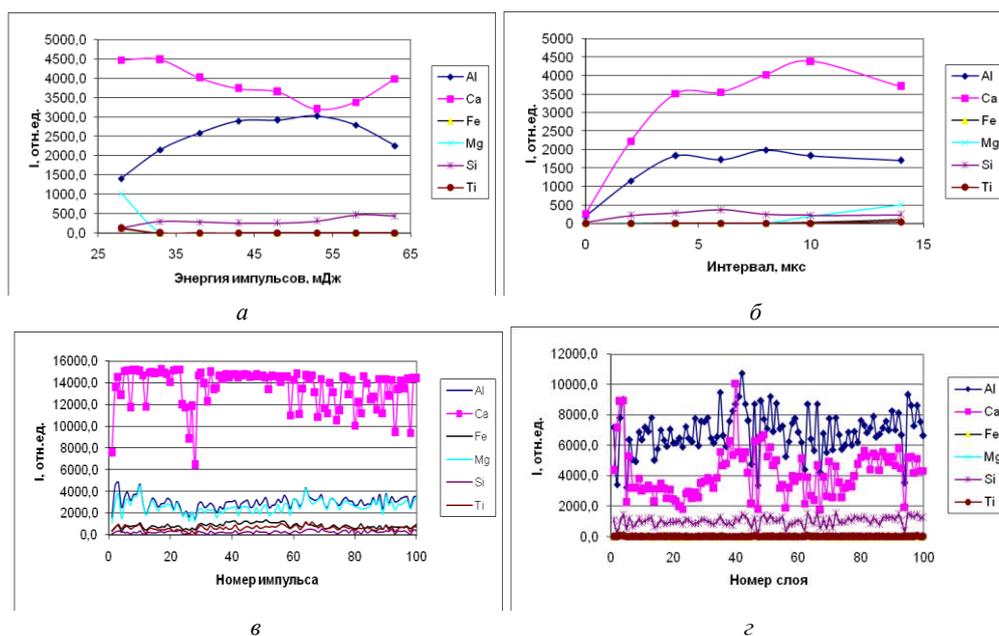


Рисунок 2 – Зависимость интенсивность линий: а) от энергии импульсов, б) от интервала между импульсами, в) от глубины (чёрная область); г) от глубины (светлая область)

Как видно из полученных данных, при увеличении энергии импульсов интенсивность линий элементов возрастает до энергии примерно равной 40–45 мДж, а затем рост замедляется. Из результатов, приведенных на рис. 2б, наглядно видно преимущество использования сдвоенных лазерных импульсов. При нулевом интервале между импульсами интенсивность практически всех линий очень мала, хотя энергия импульсов, действующих на образец, удвоенная. Исходя из полученных результатов оптимальными параметрами для анализа являются энергия 40–45 мДж, междуимпульсный интервал – 6–10 мкс.

При использовании энергии импульсов 45 мДж и интервале между импульсами равном 8 мкс проведен анализ изменения содержания элементов от глубины (рис. 2в и 2г). Как видно из полученных данных, содержание кальция в черной области существенно превышает содержание в светлой области. Черная область

является роговой обманкой. Обыкновенная роговая обманка – сложный алюмосиликат кальция, магния и железа. Образует чёрные короткостолбчатые с шестиугольным сечением кристаллы, тёмно-зелёные зернистые агрегаты, псевдоморфозы по пироксену (уралит), вкрапленные зёрна. Широко распространён, образует многие магматические и метаморфические породы. При выветривании переходит в глинистые минералы, лимонит, карбонаты. Светлая область представляет собой кварцевый диорит.

Таким образом, выполненные спектроскопические исследования характеристик приповерхностной лазерной плазмы, образуемой при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на образец диорита, позволили определить оптимальные параметры лазерных импульсов (энергию, интервал между импульсами) позволяющими определять полуколичественно содержание основных химических элементов в минералах, входящих в состав диорита из карьера Микашевичи.

Полученные результаты можно кратко объяснить следующим образом. Воздействие лазерного излучения большой интенсивности на поверхность твёрдого тела в этом случае происходит посредством абляционного процесса, заключающегося в испарении и ионизации поверхностных слоёв мишени, образовании плотной плазмы высокого давления и, как следствие, возбуждении гидродинамического движения в неиспарившейся части мишени.

При энергии импульсов более 40 мДж воздух, окружающий мишень, настолько сильно нагревается, что сам начинает поглощать падающее излучение и процесс образования плазмы перебрасывается из паров мишени в воздух. Происходит пробой воздуха. В результате образования плазмы начинается рост интенсивности ионной линии азота. При дальнейшем увеличении энергии более 55 мДж воздушная плазма начинает экранировать мишень от падающего ЛИ. Вследствие чего энерговклад в мишень и эрозионную плазму становится менее эффективным. Интенсивность атомных и ионных линий элементов снижается.

При превышении порога плазмообразования оптическая толщина образующегося при $q > q_4$ плазменного слоя будет возрастать до тех пор, пока в плазме не станет поглощаться заметная часть лазерного излучения. При достаточной плотности потока лазерного излучения нет зависимости от того, является твердое тело сильно или слабо поглощающим. В случае слабо поглощающего материала происходит быстрая ионизация атомов облучаемого вещества и коэффициент поглощения резко возрастает.

Список литературы

1. Галанин, А. В. Факторы рельефообразования на Марсе [Электронный ресурс] / А. В. Галанин // Вселенная живая. – Владивосток, 2013. – Режим доступа: <http://ukhtoma.ru/mars13.htm>.

The influence of the parameters of twin laser pulses on the formation of the component composition in laser plasma by laser atomic emission multichannel spectrometry (LAEMS) of diorite samples from the Mikashevichi quarry was studied. The optimal parameters of the laser pulses, namely the energy and the interval between the twin laser pulses that provide the maximum sensitivity of the analysis, are determined.

Мартынова Анастасия Артемовна, ученица 11 класса ГУО «Средняя школа № 64», Минск, Беларусь.

Щуревич Александра Андреевна, ученица 9 класса ГУО «Средняя школа № 64», Минск, Беларусь.

Научные руководители – *Орехова Наталия Андреевна*, учитель астрономии ГУО «Средняя школа № 64», Минск, Беларусь.

Зажогин Анатолий Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра лазерной физики и спектроскопии физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, zajogin_an@mail.ru.

УДК 535.37

А. Д. МАТЮШЕВСКАЯ

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ИНДОТРИКАРБОЦИАНИНОВОГО КРАСИТЕЛЯ ПРИ КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИИ С БЕЛКАМИ СЫВОРОТКИ КРОВИ ЧЕЛОВЕКА

Приведены результаты исследования спектральных свойств нового индотрикарбоцианинового красителя при взаимодействии с компонентами сыворотки крови человека. Определены количество и характер образующихся комплексов красителя с белками сыворотки крови.

Полиметиновые красители (ПК) нашли широкое распространение в ряде областей человеческой деятельности. Особое внимание заслуживают применение в различных медико-биологических приложениях. В лаборатории спектроскопии НИИ ПФП им. А. Н. Севченко БГУ целенаправленно ведется разработка индотрикарбоцианиновых красителей перспективных для использования в качестве основы фотосенсибилизаторов для фотодинамической терапии онкологических заболеваний. Наилучшими свойствами в этом отношении обладает индотрикарбоцианиновый краситель с двумя цепочками полиэтиленгликолей, которые ковалентно связаны с концевыми группами исходного красителя ПК154. Модификация структуры фотосенсибилизатора с помощью полиэтиленгликолей не повлияла на значимые для ФДТ фотофизические свойства, а главным образом улучшила водорастворимость и биосовместимость [1].

Исследование взаимодействия молекул красителей с белками плазмы крови позволяет лучше понять механизм доставки красителя в целевые ткани. С другой стороны, сыворотка крови наиболее доступная модельная среда для изучения перспективности использования красителя в качестве флуоресцентной метки белков. Спектрально-флуоресцентные методы традиционно используются для установления состояния красителя в таких системах.

Объектом исследования выступал краситель ПК154 (рисунок 1), который обладает хорошей растворимостью в органических растворителях, но является гидрофобным соединением. В водном окружении молекулы данного красителя склоны к агрегации, а при определенных условиях формируются также наноструктуры [2, 3]. Тип образующихся агрегатов (Н- или J-) зависит от концентрации красителя, присутствия сольватирующих добавок, температуры, ионной силы и кислотности (рН) раствора.

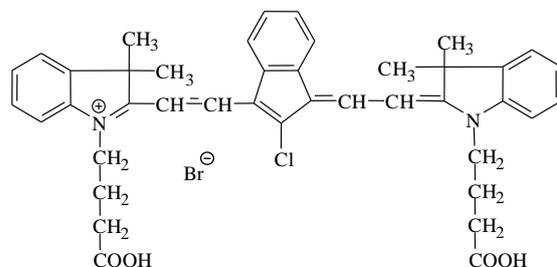


Рисунок 1 – Структурная формула индотрикарбоцианинового красителя

Исследования проводились в 3 %-м растворе сыворотки крови человека (ЧСК) в фосфатно-солевом буфере (ФСБ) с рН = 7,2. Краситель вводился через промежуточный раствор в ФСБ с 5 %-й объемной долей этанола, который в свою очередь готовился через стоковый раствор в этаноле. При данном значении рН в водном окружении при комнатной температуре (20 °С) образование Н*-агрегатов протекает с характерным временем порядка 100 минут. В течение 5–10 минут после введения красителя спектры поглощения раствора практически стабильны, в растворе присутствуют преимущественно агрегаты Н и J типа. Это позволяет минимизировать влияние процесса трансформации типов агрегатов на кинетику образования комплексов красителя с биомолекулами.

Краситель вводился в 3 %-й раствор сыворотки крови при комнатной температуре. В присутствие белковых молекул сыворотки крови происходит быстрая дезагрегация красителя с образованием узкой полосы поглощения с максимумом на 732 нм (рисунок 2). Максимум спектра флуоресценции находится на длине волны 754 нм, а его форма не зависит при возбуждении в пределах основной полосы поглощения. Кинетика затухания флуоресценция аппроксимируется одной экспонентой. Длительность затухания флуоресценции составила 1,4 нс, а степень поляризации флуоресценции – 38,2 %. Высокая степень поляризации при относительно малом времени жизни возбужденного состояния позволяет утверждать, что происходит образование комплексов красителя с крупными биомолекулами (белками, липопротеинами). После выдержки раствора в течение 90 минут при температуре 37 °С в поглощении обнаруживаются небольшие изменения (рисунок 3). Так наблюдается образование новых полос с максимумами вблизи 557 нм и 630 нм, что сопровождается уменьшением оптической плотности в максимуме основной полосы поглощения, его положение практически не изменяется. Представляется вероятным реализация процесса деструкции красителя с появлением новых полос поглощения.

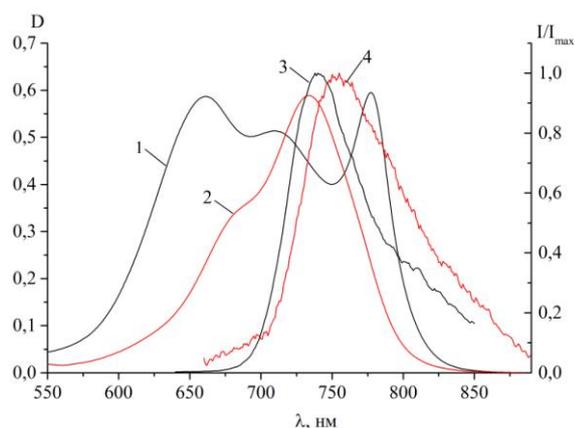


Рисунок 2 – Спектры поглощения (1, 2) и флуоресценции (3, 4) ПК154 в ФСБ (1, 3) и 3 %-м растворе ЧСК в ФСБ. Концентрация красителя 4,3 мкМ

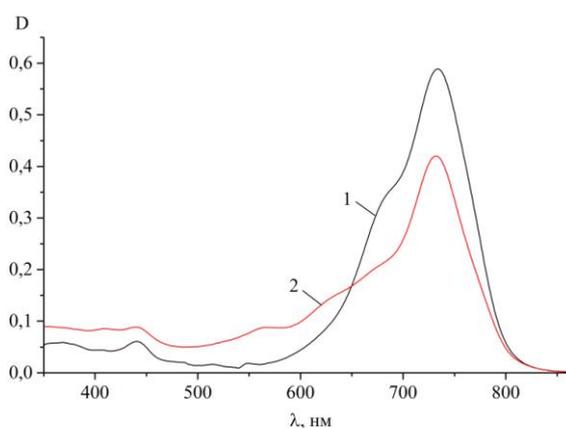


Рисунок 3 – Спектры поглощения ПК154 в 3 %-м растворе ЧСК в ФСБ после введения красителя (1) и через 90 минут инкубации при 37 °С. Концентрация красителя – 4,3 мкМ

Экстракция позволяет установить прочность и характер образующихся комплексов красителя с биомолекулами. В качестве экстрагента выбран бутанол, как один из наиболее доступных для экстракции из биологических образцов. Несомненным преимуществом бутанола является то, что он не смешивается с водой. Возможность использования его для экстракции ПК154 продемонстрирована на растворах красителя ФСБ, где степень экстракции при концентрациях красителя 10^{-6} – 10^{-5} М составила 98,4100 %.

В полярном бутаноле молекулы красителя находятся в одной ионно-молекулярной форме, так как в спектрах поглощения и флуоресценции проявляется один поглощающий и флуоресцирующий центр. Максимум поглощения красителя в бутаноле расположен на длине волны 732 нм, флуоресценции – на 757 нм. Длительность затухания флуоресценции красителя составляет 1,0 нс, степень поляризации флуоресценции – 30,0 %, что характерно для данного соединения в полярных органических растворителях.

Для экстракции красителя из 3 %-го раствора ЧСК бутанол добавлялся в равной объемной доле. Затем полученная смесь механически перемешивалась и обрабатывалась ультразвуком в течение 60 минут, после чего образец выдерживался на протяжении 3 суток при комнатной температуре. Затем с помощью центрифуги выполнено разделение смеси на три части – водную, бутанольную и осадок, спектры поглощения и флуоресценции которых приведены на рисунках 4 и 5. Спектральные параметры молекул красителя, перешедших в бутанольный экстракт, совпадают со значениями в чистом бутаноле. Совпадение зафиксировано на основании анализа формы спектров поглощения и флуоресценции, а также длительности затухания (0,9 нс) и степени поляризации флуоресценции (30,5 %). Можно утверждать, что в бутанольном экстракте краситель находится свободном состоянии. На основании анализа спектров поглощения определена степень экстракции, которая составила 55,0 %. Следовательно, при взаимодействии с компонентами ЧСК главным образом образуется нековалентный комплекс.

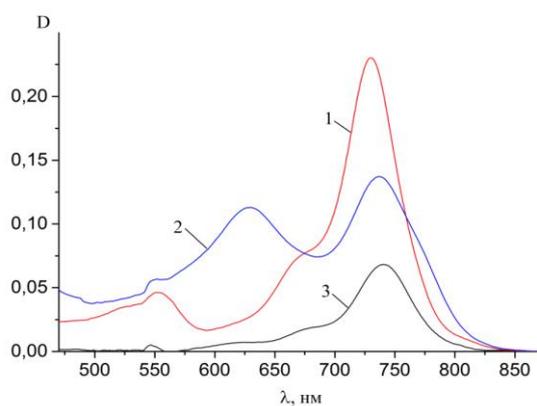


Рисунок 4 – Спектры поглощения бутанольного экстракта (1), водного осадка (2) и белкового осадка (3) при экстракции из 3 %-го раствора ЧСК в ФСБ

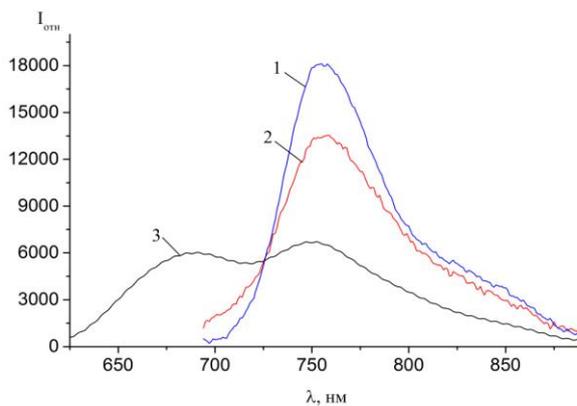


Рисунок 5 – Спектры флуоресценции бутанольного экстракта при возбуждении 684 нм (1), водного осадка при возбуждении 610 нм (2) и 684 нм (3) при экстракции из 3 %-го раствора ЧСК ФСБ

В водном осадке обнаруживаются два выраженных поглощающих центра с максимумами поглощения вблизи 739 нм и 630 нм, каждый из которых проявляется во флуоресценции с максимумами на длинах волн 756 нм и 687 нм. Измерения степени поляризации флуоресценции данных центров показали значения 42,0 % и 43,6 % соответственно, при этом длительность затухания флуоресценции имеет наносекундные значения – 1,4 нс и 0,6 нс. По всей видимости, длинноволновый центр соответствует ковалентному комплексу красителя с крупной белковой молекулой. Расчет по спектру поглощения показал, что на его долю приходится 25 % от общего количества введенного красителя. Сильное смещение в коротковолновую область для второго центра позволяет предположить, что ему соответствует комплекс фрагмента красителя с биомолекулой.

В спектре поглощения бутанольного экстракта также присутствует выраженная полоса с максимумом на длине волны 553 нм, положение которой коррелирует с полосой на 557 нм в спектре поглощения красителя в растворе ЧСК до экстракции. Данный центр также вероятно сформирован фрагментами красителя в результате его деструкции при взаимодействии с компонентами ЧСК.

Таким образом, было установлено, что в результате взаимодействия индотрикарбоцианинового красителя с компонентами сыворотки крови человека образуются нековалентный (55 %) и ковалентный (25 %) комплексы с белковыми молекулами, происходит деструкция красителя и связывание его фрагментов с биомолекулами.

Список литературы

1. Novel indotricarbocyanine dyes covalently bonded to polyethylene glycol for theranostics / A. A. Lugovski [et al.] // Journal of Photochemistry and Photobiology. A : Chemistry. – 2016. – Vol. 316. – P. 31–36.
2. Спектрально-люминесцентные свойства и морфология самоорганизованных наноструктур индотрикарбоцианинового красителя / Н. В. Белько [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2018. – Т. 84, № 6. – С. 868–878.
3. Effects of the interaction of nanostructured photosensitizers based on polymethine dyes with blood plasma proteins (in Russ.) / I. I. Khludzev [et al.] // Medelectronics – 2018. Tools of medical electronics and novel medical technologies: proceedings of a scientific technical conference. Minsk, 5–6 December, 2018. – P. 215–217.

The results of the study of spectral properties of the new indotricarbocyanine dye in interaction with components of human blood serum are presented. The quantity and nature of the resulting complexes of the dye with serum proteins were determined.

Матюшевская Анна Дмитриевна, магистрант физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, anna.dm1211@gmail.com.

Научные руководители – *Тарасов Дмитрий Сергеевич*, научный сотрудник лаборатории спектроскопии НИИ ПФП им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, dmitrij-tarasov@list.ru.

Самцов Михаил Петрович, доктор физико-математических наук, доцент, НИИ ПФП им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, samtsov@bsu.by.

УДК 535.555:535.515:535.394.5

Е. П. ПАНТЕЛЕЕВА

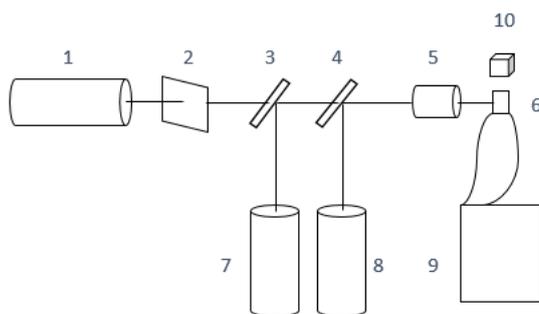
ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫЕ ПЛАНАРНЫЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Выполнен анализ особенностей распространения вертикально поляризованной световой волны при её взаимодействии с рефрактивной границей в электрически контролируемом ЖК элементе с фрагментарным электродом.

Одним из существенных преимуществ жидкокристаллических (ЖК) элементов является возможность плавного и локального управления преломлением, рассеянием, отражением, поглощением света при помощи электрических, световых, магнитных и тепловых воздействий. Так же ЖК элементы обладают большой величиной анизотропии показателя преломления ($\Delta n \approx 0,1-0,4$), которой можно управлять низкими внешними напряжениями ($U \approx 1-10$ В).

В данном докладе представлены результаты исследования распространения вертикально поляризованного излучения в двухдоменном ЖК элементе с показателями преломления $n_o = 1,49$ для обыкновенной и $n_e = 1,67$ для необыкновенной волны.

Исследования проводились при однонаправленном вводе в ЖК элемент лазерного излучения с длинами волн 632,8 нм, 520 нм, 405 нм. В ходе данной работы изменялась амплитуда электрических прямоугольных сигналов и угол падения световой волны на рефрактивную границу. Картины распространения пучков в ЖК элементе регистрировались CCD камерой. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.



1 – He-Ne лазер (длина волны 632,8 нм), 2 – светофильтр, 3–4 – полупрозрачное зеркало, 5 – 20X микробиъектив, 6 – ЖК элемент, 7 – DL – лазер (длина волны 520 нм), 8 – DL – лазер (длина волны 405 нм), 9 – генератор прямоугольных сигналов; 10 – CCD камера

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

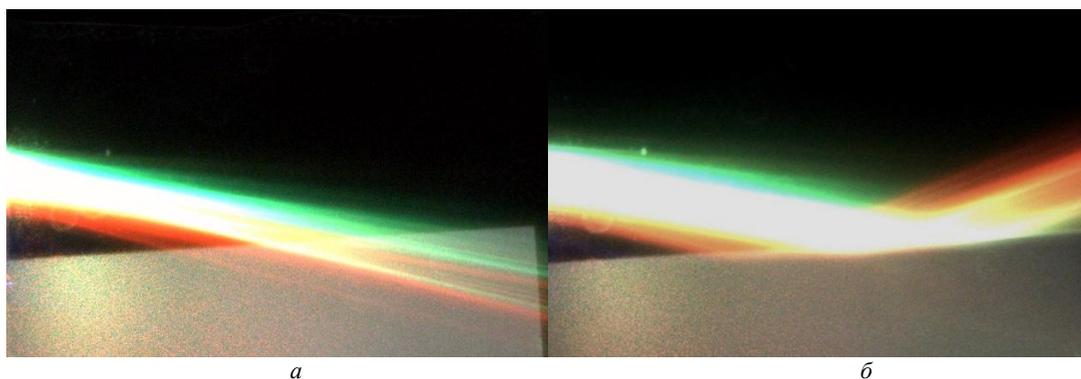


Рисунок 3 – Фотография явления ПВО вертикально поляризованной световой волны при её взаимодействии с рефрактивной границей ЖК элемента при угле падения на рефрактивную границу $\alpha = 72^\circ$ и при управляющем напряжении: а) $U = 0$ В, б) $U = 10$ В

Проведённая экспериментальная работа позволила определить особенности распространения вертикально поляризованной световой волны при её взаимодействии с рефрактивной границей в двухдоменной ЖК ячейке с ортогональной ориентацией директора. Реализован эффект ПВО вертикально поляризованного лазерного излучения от электрически управляемой рефрактивной границы.

Список литературы

1. A new electro-optic waveguide architecture and the unprecedented devices it enables / S. R. Davis [et al.] // Proc. SPIE. – 2008. – Vol. 6975: Enabling Photonics Technologies for Defense, Security, and Aerospace Applications IV, Orlando, 16-20 March 2008. – P. 697503.
2. Коншина, Е. А. Оптика жидкокристаллических сред / Е. А. Коншина. – СПб. : СПб НИУ ИТМО, 2012. – 128 с.
3. Мельникова, Е. А. Полное внутреннее отражение на границе раздела двух ориентаций директора жидкого кристалла / Е. А. Мельникова, И. И. Рушнова // Вестн. БГУ. Сер. 1. – 2016. – № 2. – С. 3–7.
4. Electrically controlled spatial-polarization switch based on patterned photoalignment of nematic liquid crystals / E. A. Melnikova [et al.] // Applied Optics. – 2016. – Vol. 55, № 23. – P. 6491–6495.
5. Light propagation in periodic photonic structures formed by photo-orientation and photo-polymerization of nematic liquid crystals / K. A. Rutkowska [et al.] // Opto-Electronics Review. – 2017. – Vol. 25. – P. 118–126.
6. Блинов, Л. М. Жидкие кристаллы: Структура и свойства / Л. М. Блинов. – М. : ЛИБРОКОМ, 2013. – 480 с.
7. Томилин, М. Г. Свойства жидкокристаллических материалов / М. Г. Томилин, С. М. Пестов. – СПб. : «Политехника», 2005. – 296 с.

The features of the propagation of a vertically polarized light wave during its interaction with the refraction boundary in an electrically controlled LC element with a fragmented electrode are analyzed. The effect of total internal reflection of vertically polarized laser radiation from an electrically controlled refractive boundary is realized.

Пантелеева Екатерина Петровна, студентка физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, fiz.pantelee@bsu.by.

Научный руководитель – *Мельникова Елена Александровна*, кандидат физико-математических наук, доцент, физический факультет Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, Melnikova@bsu.by.

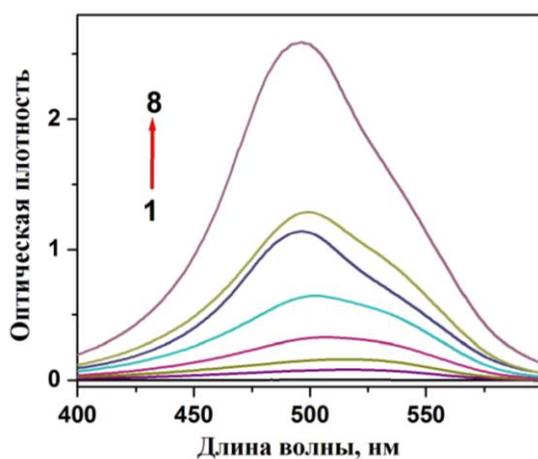
УДК 577.346:577.352.333

Е. И. ПЛИГИН

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА НОВОГО БЕНЗТИАЗОЛОВОГО КРАСИТЕЛЯ

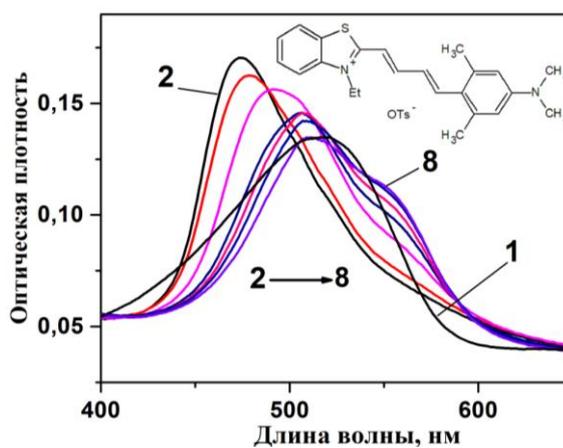
Исследованы спектры поглощения и флуоресценции водных растворов нового бензтиазолового красителя (Th-C23) при его различных концентрациях и при встраивании в белок – бычий сывороточных альбумин (БСА). Показано, что при концентрации красителя более 0,25 ммоль/л имеет место агрегация молекул, что сопровождается гипсохромным сдвигом спектров поглощения. При встраивании красителя в БСА положение спектра поглощения и флуоресценции не изменяется, однако интенсивность свечения увеличивается в 25 раз.

Среди флуоресцентных красителей важное место занимают молекулярные ротаторы (МР). Особенность флуоресцентных свойств МР состоит в том, что в маловязких растворителях они обладают чрезвычайно низким квантовым выходом [1] (~0,001). Однако в вязких растворах и при встраивании в структуру полимеров квантовый выход их флуоресценции увеличивается на 2–3 порядка. Причиной низкого квантового выхода МР является переход молекулы в возбужденном состоянии из плоской конформации к скрученной, при которой фрагменты молекулы образуют двухгранный угол, близкий к 90°. Изменение конформации сопровождается внутримолекулярным переносом заряда [2]. Поскольку конформационный переход зависит от вязкости и температуры в локально малых объемах [2]. Еще одним важным применением МР является их использования для диагностики и изучения упорядоченных белковых агрегатов – амилоидных фибрилл, являющихся сопутствующим фактором многих заболеваний (болезнь Альцгеймера, Паркинсона и др.). Наиболее часто используемым для этих целей является тιοфлавин Т [3], также проявляющий свойства молекулярного ротатора. Однако существенным недостатком молекулярных ротаторов, используемых для биологических исследований, является их поглощение и флуоресценция в сине-зеленой области спектра, где велико поглощение биологических тканей. В связи с этим синтез и исследование новых красителей, проявляющих свойства молекулярных ротаторов и имеющих флуоресценцию и поглощение в красной области спектра.



Концентрация Th-C23: 0,25 (1); 4 (2); 16 (3) мкмоль/л; 0,125 (4); 0,25 (5); 0,45 (6); 0,5 (7); 1 моль/л (8)

Рисунок 1 – Спектры поглощения водного раствора Th-C23 при его различной концентрации



Концентрация ПСС: 0 (1); 0,1 (2); 0,2 (3); 0,6 (4); 1,0 (5); 1,4 (6); 1,8 (7); 2,4 мкмоль/л (8)

Рисунок 2 – Спектры поглощения водного раствора Th-C23 (5,5 мкмоль/л) при различной концентрации ПСС. На вставке приведена структурная формула красителя

В настоящей работе приведены результаты исследования спектров поглощения и флуоресценции нового бензтиазолового красителя (Th-C23). При нейтральных pH в водном растворе молекула красителя существует в катионной форме, что обуславливает хорошую их растворимость. Однако многие ионные красители склонны к образованию агрегатов, что приводит к изменению их спектральных свойств. На рисунке 1 приведены спектры поглощения красителя при его различной концентрации. При низкой (микромольной) концентрации максимум спектра расположен при 515 нм. При увеличении концентрации красителя в водном растворе более 0,25 ммоль/л наряду с возрастанием оптической плотности можно заметить изменение формы спектра. При

концентрации красителя 1 ммоль/л максимум спектра соответствует длине волны 490 нм. Наблюдаемый гипсохромный сдвиг спектра, составляющий более 20 нм, вызван агрегацией красителя.

Как известно, внесение в раствор ионных полиэлектролитов может существенно усиливать процесс агрегации красителей [4]. Наши результаты подтверждают это. Из рисунка 2 видно, что добавлении небольшой концентрации (0,1 мкмоль/л) анионного полиэлектролита, полистиролсульфоната (ПСС), имеет место значительный коротковолновый сдвиг максимума спектра поглощения ~35 нм. Дальнейшее увеличение концентрации полиэлектролита приводит к монотонному сдвигу спектра в обратную сторону и его уширению. При этом в длинноволновой области (~550 нм) в спектре поглощения появляется дополнительная полоса. Столь необычное изменение спектра поглощения красителя мы объясняем следующим образом. Взаимодействие ионных молекул красителей с полиэлектролитами осуществляется за счет электростатических сил, причем при избыточной концентрации красителя полиэлектролит инициирует агрегацию. При низкой концентрации ПСС вблизи отрицательно заряженных SO_3^- -групп полиэлектролита за счет кулоновских взаимодействий создается высокая концентрация молекул красителя, что приводит к их агрегации. При увеличении концентрации ПСС число SO_3^- -групп увеличивается и в растворе присутствует несколько форм красителя: димеры или агрегаты более высокого порядка, связанные с ПСС (1); свободные молекулы Th-C23 в мономерной форме (2), и молекулы красителя в мономерной форме, связанные с ПСС (3). Последние имеют положение максимума спектра поглощения при 550 нм.

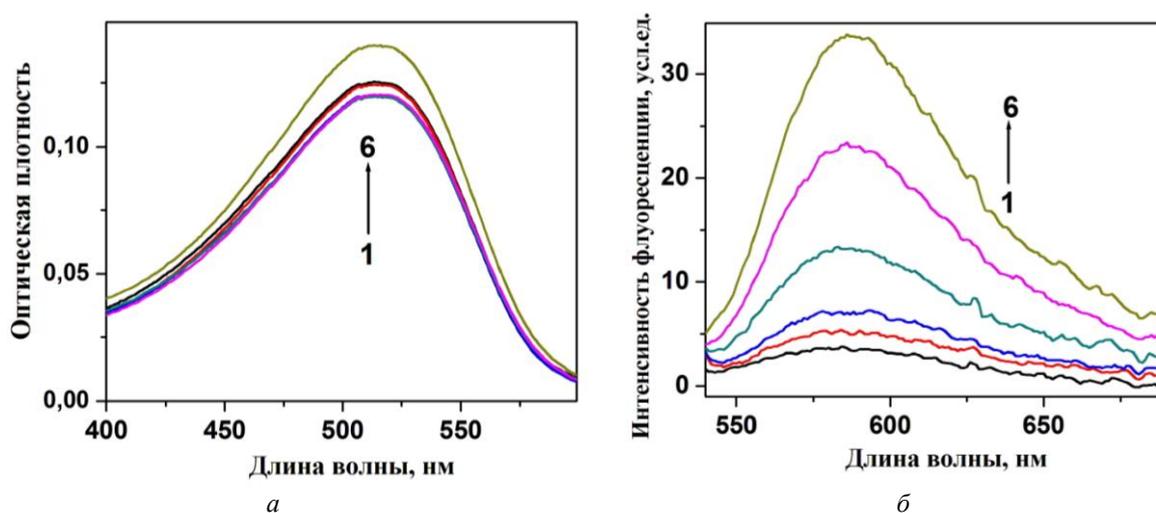


Рисунок 3 – Спектр поглощения (а) и флуоресценции (б) водного раствора Th-C23 (5 мкмоль/л) при добавлении 0,06 (1); 0,125 (2); 0,25 (3); 0,5 (4); 0,75 (5) и 1,0 мг/мл (6) БСА

При добавлении в водный раствор красителя белка бычьего сывороточного альбумина (БСА) положение максимума спектра поглощения не изменяется. Наблюдается только небольшое увеличение оптической плотности при возрастании концентрации БСА, очевидно вследствие увеличения рэлеевского рассеяния. Из рисунка 3б следует, что при добавлении 1 мг/мл белка интенсивность флуоресценции существенно увеличивается примерно в 25 раз.

Список литературы

1. Fluorescence Quantum Yield of Thioflavin T in Rigid Isotropic Solution and Incorporated into the Amyloid Fibrils / A. I. Sulatskaya [et al.] // PLoS ONE. – 2010. – Vol. 5, Is. 10, e15385. – P. 1–7.
2. Haidekker, M. A. A Ratiometric Fluorescent Viscosity Sensor / M. A. Haidekker // J. Am. Chem. Soc. – 2006. – Vol. 128. – P. 398–399.
3. LeVine, H. Thioflavine T interaction with amyloid-sheet structures / H. LeVine // Int. J. Exp. Clin. Invest. – 1995. – Vol. 2, Is.1. – P. 1–6.
4. Маскевич, А. А. Особенности спектральных свойств тиофлавина Т при его встраивании в полиэлектролиты / А. А. Маскевич, С. А. Кургузенков, А. В. Лавыш // Веснік Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы, Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2015. – № 1. – С. 60–70.

The absorption and fluorescence spectra of aqueous solutions of the new benzothiazole dye (Th-C23) were studied at its various concentrations and upon incorporation into bovine serum albumin (BSA). It was shown that at a dye concentration of more than 0.25 mmol/L, aggregation of molecules takes place, which is accompanied by a hypsochromic shift of the absorption spectra. When a dye is incorporated into BSA, the position of the absorption and fluorescence spectra does not change, however, the fluorescence intensity increases by 25 times.

Плигин Егор Игоревич, студент 2-го курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, epligin@tut.by.

Научный руководитель – Маскевич Александр Александрович, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой общей физики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, amaskevich@grsu.by.

УДК 539.21

С. А. ПРИЛУЦКИЙ

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ СТРУКТУРЫ И МИКРОТВЁРДОСТИ ЦИРКОНИЯ, ОБРАБОТАННОГО КОМПРЕССИОННЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ

Представлены результаты исследования структурно-фазового состояния циркония, подвергнутого воздействию компрессионных плазменных потоков (КПП) в атмосфере азота и отожжённых при температуре 500 °С. Установлен характер изменения параметров решетки Zr и микротвердости поверхностного слоя от времени отжига.

Цирконий является основным элементом, используемым в производстве топливных оболочек (ТВЭЛов) реакторов второго и третьего поколения, эксплуатирующихся и строящихся в настоящее время. В связи с требованиями продления периода эксплуатации реакторов актуальным является вопрос модификации оболочек ТВЭЛов с целью повышения их механических свойств и коррозионной стойкости. Эффективным методом модификации структурно-фазового состояния поверхности материала является использование компрессионных плазменных потоков (КПП).

Обработка образцов циркония осуществлялась тремя импульсами компрессионных плазменных потоков на расстояниях от катода 6–14 см в режиме «остаточного газа», при котором предварительно откачанную вакуумную камеру заполняли рабочим газом – азотом до давления 400 Па. Напряжение на конденсаторной батарее составляло 4 кВ. Изменение расстояния до образца позволяло варьировать плотность энергии (Q), поглощенной поверхностью, в диапазоне 7–27 Дж/см². После обработки поверхности КПП образцы отжигались в муфельной печи на воздухе при температуре 500 °С в течение 1–5 часов. Структурно-фазовое состояние поверхностного слоя исследовалось методом рентгеноструктурного анализа с помощью дифрактометра Rigaku Ultima IV в излучении Cu K α в фокусировке параллельных пучков. Измерение микротвердости выполнялось на полуавтоматическом микротвердомере Викакса 402MVD Instron Wolpert Wilson Instruments при нагрузке 100 г и времени выдержки 10 с.

В результате воздействия КПП и дальнейшего отжига происходит изменение фазового состава поверхностного слоя образцов (рис 1). Во всем диапазоне изменения Q при обработке КПП, генерируемых в атмосфере азота, происходит формирование нитрида циркония что обусловлено диффузионным насыщением поверхностных слоев азотом [1].

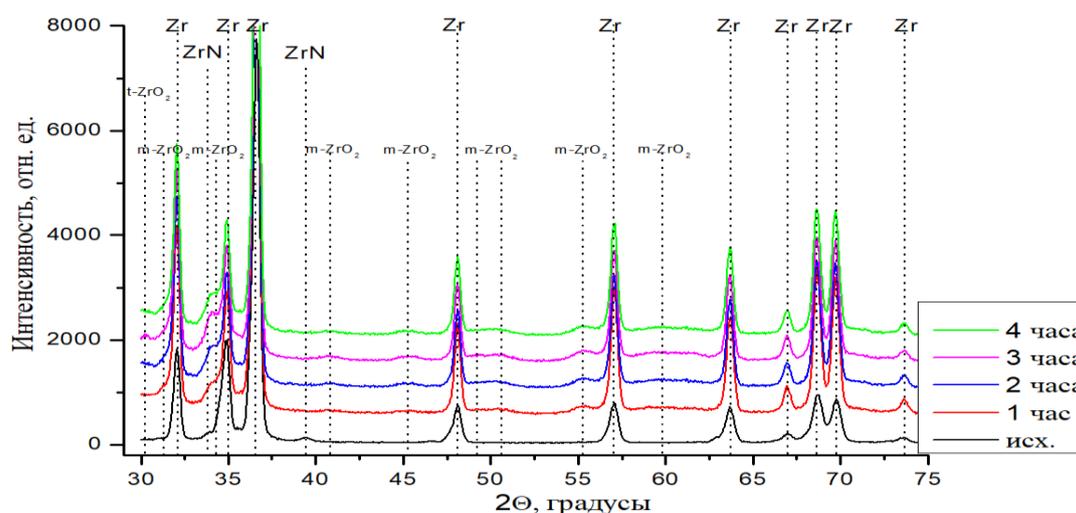


Рисунок 1 – Дифрактограммы образца, обработанного тремя импульсами КПП с $Q = 27$ Дж/см² и отожжённого в течение различного времени

Во время отжига кислород растворяется в поверхностном слое металла, и при достижении определенной его концентрации на поверхности образуется оксид ZrO_2 [3]. Это подтверждается анализом дифрактограмм, на которых наблюдается исчезновение пиков нитрида циркония и появление пиков моноклинной и тетрагональной фазы диоксида циркония.

С помощью рентгеноструктурного анализа было выявлено смещение дифракционных пиков циркония относительно значений эталона, как после обработки КПП, так и последующего отжига. По величине смещения было определено изменение параметров решетки (рис. 2). Параметры решетки a и c эталонного образца циркония составляют 3.231 и 5.148 Å.

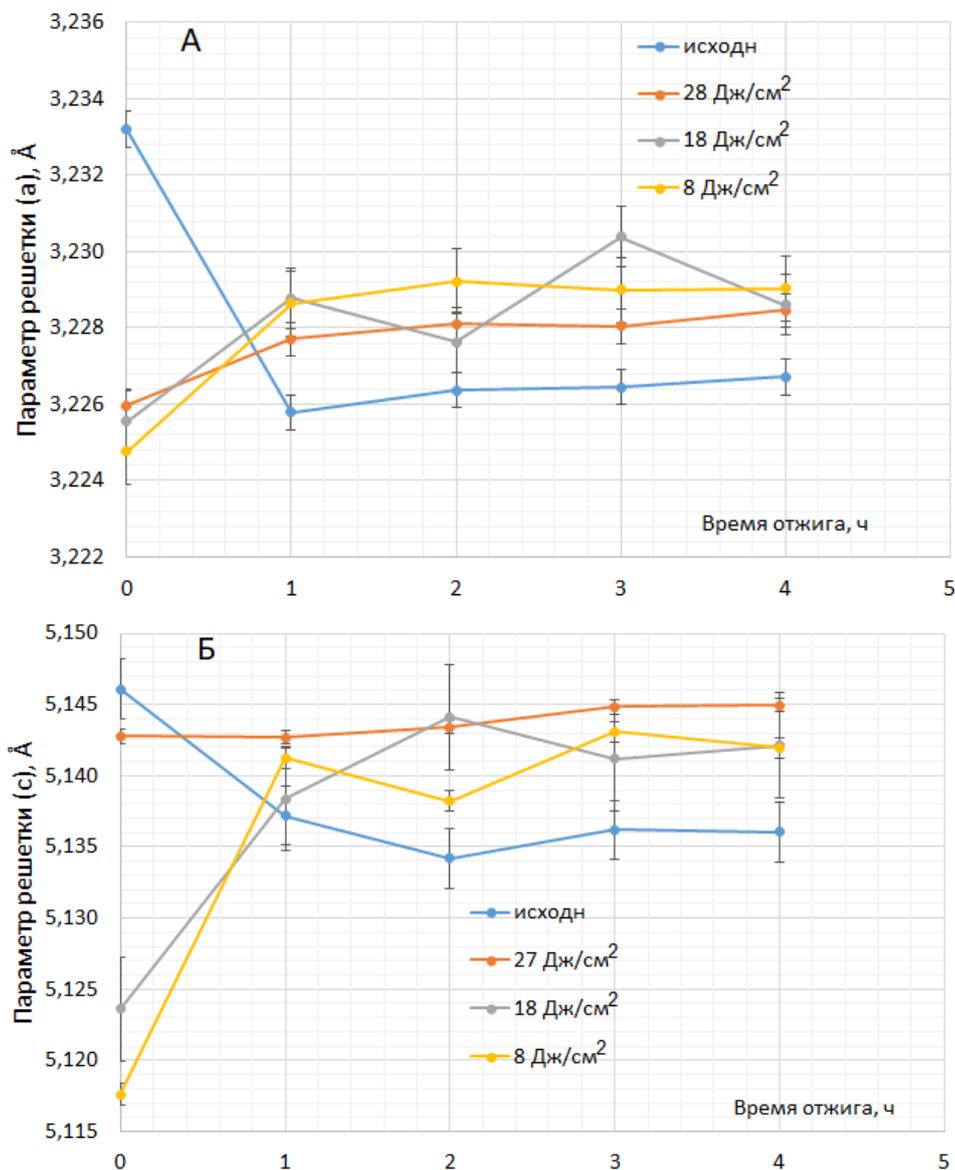


Рисунок 2 – Зависимость параметров a (А) и c (Б) решётки исходного образца и образцов, обработанных КПП при различных режимах, от времени отжига

Уменьшение параметров решётки после обработки КПП может свидетельствовать об остаточных растягивающих напряжениях, возникающих при термическом воздействии [3]. При этом величина напряжений зависит от режимов воздействия (рис. 2). После одного часа отжига происходит увеличение параметров решетки Zr из-за частичного снятия остаточных напряжений. Однако их значения остаются меньше эталонных, что может быть обусловлено влиянием растущего на поверхности оксида циркония. При дальнейшем увеличении времени отжига параметры решетки не изменяются.

Наблюдаемые структурно-фазовые изменения ведут к изменению свойств поверхностного слоя. На рисунке 3 представлены результаты измерения микротвердости поверхности после обработки КПП и отжига. Глубина индентирования составляла ~ 3 мкм.

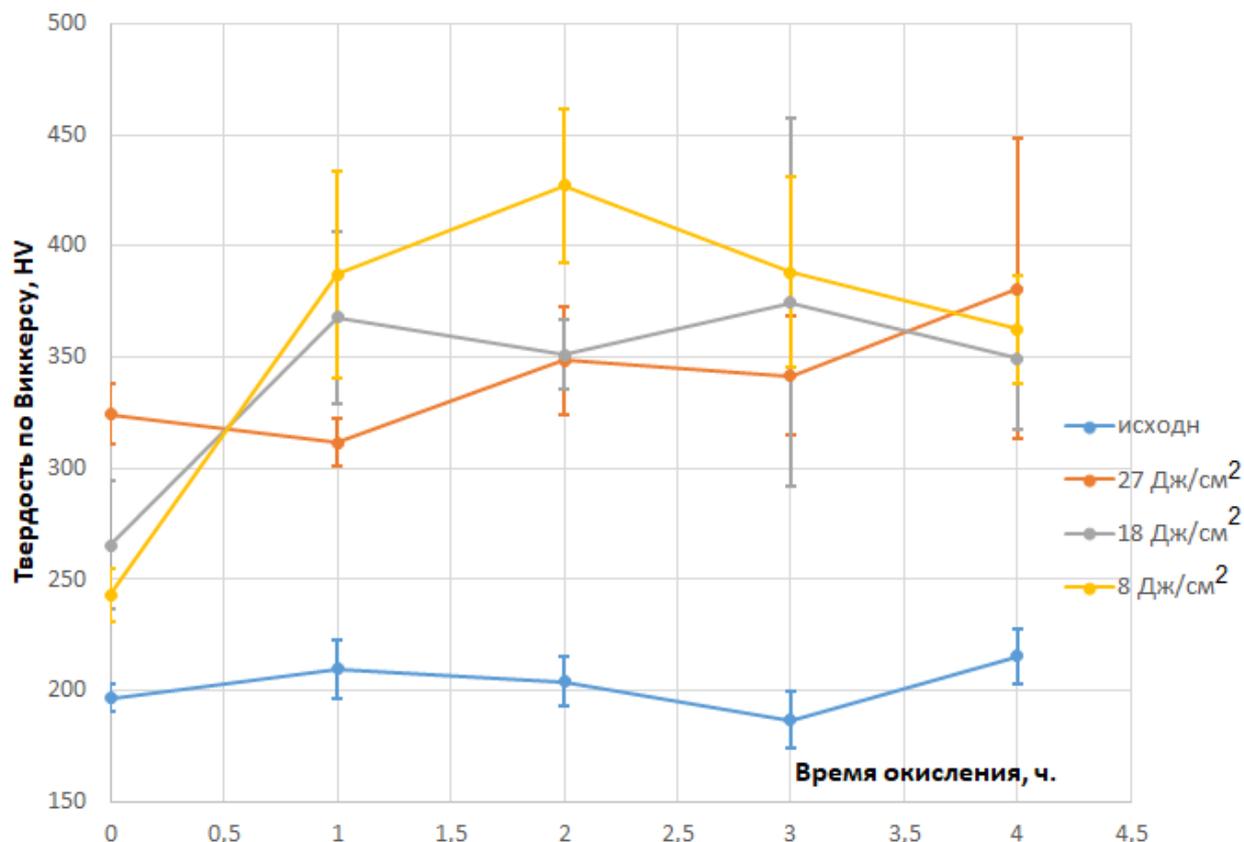


Рисунок 3 – График зависимости микротвердости исходного образца и образцов, обработанных КПП при различных режимах, от времени отжига

Как видно из рисунка, после обработки КПП происходит увеличение микротвердости, что может быть связано с образованием нитрида циркония [3]. При последующем отжиге в течение 1 часа, несмотря на растворение нитрида, происходит увеличение микротвердости, значение которой не меняется при увеличении времени отжига.

Таким образом было показано, что отжиг на воздухе при температуре 500 °С циркония, обработанного компрессионными плазменными потоками, ведет к растворению ZrN, росту ZrO₂ с моноклинной и тетрагональными кристаллическими решетками, частичному снятию остаточных напряжений и увеличению микротвердости поверхностного слоя.

Список литературы

1. Surface nitriding and alloying of steels with Ti and Nb atoms by compression plasma flows treatment / N. N. Cherenda [et al.] // Vacuum. – 2016. – Vol. 129. – P. 170–177.
2. Влияние легирования и термической обработки на структуру и свойства циркония : учеб. пособие / И. И. Чернов [и др.]. – М. : МИФИ, 2007. – 84 с.
3. Nitridation of zirconium using energetic ions from plasma focus device / I. A. Khan [et al.] // Thin Solid Films 516. – 2008. – P. 8255–8263.

Experimental results of structure, phase composition and microhardness of zirconium subjected to compression plasma flows treatment in a nitrogen atmosphere and subsequent annealing in air at 500 °C are presented. Dependences of the zirconium lattice parameters and surface layer microhardness on annealing time are established.

Прилуцкий Сергей Александрович, студент физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, 375298418315@yandex.ru.

Научный руководитель – Черенда Николай Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, cherenda@bsu.by.

Т. А. ПРОКОПЕНКО, Н. И. НЕЧИПУРЕНКО

МОРФОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ И ЛАЗЕРНАЯ АТОМНО-ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ ФАЦИЙ КАПЕЛЬ ПЛАЗМЫ КРОВИ В ДИАГНОСТИКЕ У ПАЦИЕНТОВ С ЦЕРЕБРОВАСКУЛЯРНОЙ ПАТОЛОГИЕЙ

Рассмотрены вопросы разработки методик морфологического анализа и полуколичественной оценки локального пространственного распределения кальция в фациях капель плазмы крови человека методом локальной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии. Показано, что использование метода клиновидной дегидратации позволяет установить особенности характера растрескивания фаций и распределения коллоидно-белковых частиц при различных видах ЦВЗ. Полученная оперативная информация по распределению кальция позволяет уточнить диагноз и скорректировать лечение.

Ишемические повреждения головного мозга, главным образом, цереброваскулярная болезнь, расценивается в настоящее время как синдром острого и хронического повреждения мозга. Ввиду высокой распространённости ишемическая болезнь мозга представляет собой серьёзную медико-социально-экономическую проблему. Особенно актуальным является изучение возникновения артериальной аневризмы головного мозга, как основной причины развития геморрагического инсульта. Это обуславливает поиск патогенетически обоснованных методов лечения внутримозговых катастроф [1].

Возникновение церебрального инсульта всегда является результатом целого комплекса патофизиологических воздействий. Сюда относятся и нарушения функционально-морфологических свойств сосудов мозга, и дисрегуляция системной гемодинамики и гемостаза организма [2–4].

Базовый механизм повреждения мозговой ткани при инфаркте мозга – снижение или полное прекращение поступления крови по сосуду, питающему участок вещества мозга, наиболее часто в результате тромбоза или эмболии. Основой развития геморрагического инсульта является разрыв сосуда или аномальная проницаемость стенок сосудов.

В этой связи для визуализации динамики патологических процессов особое значение приобретает оценка не только общего и сиюминутного, но, более всего, ретроспективного накопления и распределения ЖНЭ, в первую очередь – кальция, в организме человека. С этой целью для получения дополнительной диагностической информации в настоящей работе изучены морфоструктура, а также количественное пространственное распределение кальция в фациях плазмы крови пациентов.

Для изучения структурирования фации каплю плазмы крови пациентов объемом 10 мкл наносили на поверхность тщательно промытой подложки из ПММА, высушивали при комнатной температуре в течение 90-100 минут. Для получения снимков фаций использовали оптический микроскоп Биолам со светодиодной подсветкой (на пропускание) и веб-камерой, работающий с компьютером по USB-2 порту.

Для оценки локального пространственного распределения кальция использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. Все эксперименты проводили в атмосфере воздуха при нормальном атмосферном давлении. Лазерное излучение фокусировали на образец с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 100 мм. Размер пятна фокусировки примерно 50 мкм.

Морфология центральной части высохшей через 90 минут капли плазмы крови пациентов приведена на рис. 1.

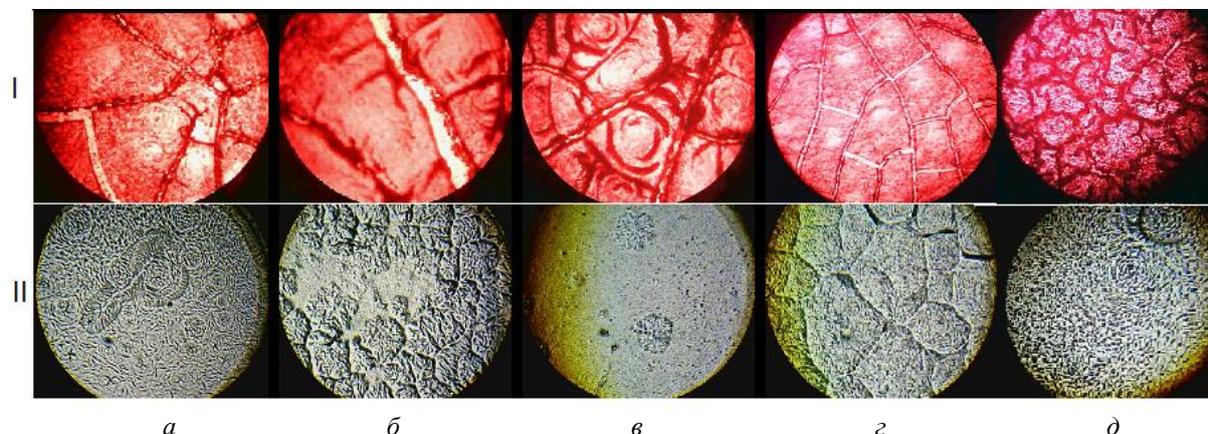


Рисунок 1 – Снимки фаций цельной крови и плазмы пациентов до и после лечения (увеличение 130)

Качественный сравнительный анализ структуры поверхности образцов цельной крови показал, что у пациентов с ЦВЗ имеются отличия от здоровых лиц. У группы пациентов с ДЭ преобладает наличие трехлучевых (признак застойных явлений в организме, в том числе в тканях головного мозга), штриховых (признак ДЭ) и широких (маркер склеротических изменений) трещин. У пациентов с ТИА имеются жгутовые трещины, свидетельствующие о гипоксии.

Однородная, равномерная зона мелких завитков характерна для центра фации доноров. При патологии отклонения, обусловленные нарушением стандартных соотношений «белок-соль», вызывают нерегулируемые конформационные изменения, связанные с уникальностью альбумина (наличие амино- и карбоксильных групп в его молекуле – полиамфолитность). Наблюдаем совершенно очевидное существенное отличие структуры фации пациентов от донора.

Структура фаций плазмы пациентов с ЦВЗ характеризуется потерей симметрии расположения основных элементов фации (трещин, конкреций, отдельностей). Даже у пациентов с одинаковым заболеванием не наблюдается схожей морфологической структуры дегидратирующей капли, что может быть результатом действия различных этиологических факторов при формировании патологии.

Для оценки локального пространственного распределения кальция использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. Все эксперименты проводили в атмосфере воздуха при нормальном атмосферном давлении. Лазерное излучение фокусировали на образец с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 100 мм. Размер пятна фокусировки примерно 50 мкм. Распределение кальция по поверхности и слоям фации представлено на рисунке 2.

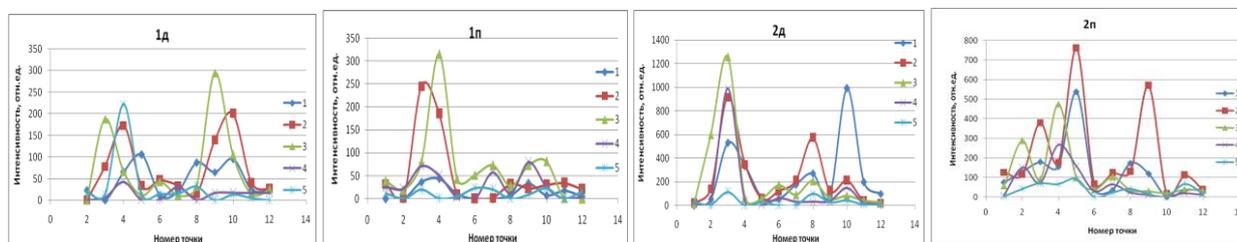


Рисунок 2 – Интенсивность линии Ca II (393,239 нм) в атомно-эмиссионных спектрах плазмы крови пациентов

Очевидны существенные различия в характере распределения кальция в фации плазмы крови пациентов. В процессе высыхания капель происходит хаотичное образование центров коагуляции, наблюдается разброс концентрации кальция как по поверхности, так и слоям, что свидетельствует об изменении связывающей способности альбумина при патологии. Это приводит к аномальной коагуляции белка и увеличению концентрации кальция в центре фации и в более глубоких слоях, что не характерно для здорового человека. Хорошо известно, что у здорового человека кальций распределен только по поверхности высохшей капли, в центральной части капли оценивается доля ионизированного кальция. При равномерной диффузии БЖ к краям в процессе испарения жидкости максимальная концентрация связанного кальция приходится на краевой белковый валик.

Приведенные данные показывают, что у больных концентрация кальция ниже, чем у здорового человека. Кроме того, в процессе высыхания капель происходит хаотичное образование центров коагуляции, наблюдается разброс концентрации кальция как по поверхности, так и слоям. Налицо изменение связывающей способности альбумина при патологии. Это приводит к аномальной коагуляции белка и увеличению концентрации кальция в более глубоких слоях, что совершенно не характерно для здорового человека.

Максимальные концентрации кальция в 3 слое фации особенно характерны для пациента 1–3. Следует отметить, что при сравнении результатов для пациента как до операции, так и после операции максимальная концентрация кальция наблюдается в 3 слое. В то же время у пациента 2 наблюдаются положительные изменения, а именно, максимум поднимается во второй слой после операции.

Таким образом, использование метода клиновидной дегидратации позволяет установить особенности характера растрескивания фаций и распределения коллоидно-белковых частиц при различных видах ЦВЗ. Полученная оперативная информация позволяет уточнить диагноз и скорректировать лечение. Всесторонняя аналитическая информация при обсуждении диагноза будет способствовать более глубокому пониманию характера протекания патологических процессов и более успешному лечению заболеваний ЦНС.

Список литературы

1. Гусев, Е. И. Ишемия головного мозга / Е. И. Гусев, В. И. Скворцова. – М. : Медицина, 2001. – 328 с.
2. Шабалин, В. Н. Морфология биологических жидкостей человека / В. Н. Шабалин, С. Н. Шатохина. – М. : Хризом, 2001. – 304 с.

The paper deals with the development of methods for morphological analysis and semi-quantitative assessment of the local spatial distribution of calcium in the facies of human plasma droplets using local atomic emission multichannel spectrometry. It is shown that the use of the wedge-shaped dehydration method makes it possible to establish the features of the character of facies cracking and the distribution of colloid-protein particles in different types of CVS. The received operational information on the distribution of calcium allows you to clarify the diagnosis and correct treatment.

Прокопенко Татьяна Анатольевна, аспирантка кафедры радиобиологии Международного государственного экологического института имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.

Научные руководители – *Нечипуренко Наталья Ивановна*, доктор медицинских наук, профессор, заведующий лабораторией РНПЦ неврологии и нейрохирургии, Минск, Беларусь.

Зажогин Анатолий Павлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, zajogin_an@mail.ru.

УДК 533.9.082.5;543.423;621.373.826

Т. А. ПРОКОПЕНКО, Н. И. НЕЧИПУРЕНКО

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОРФОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА И ИК СПЕКТРОВ ФАЦИЙ КАПЕЛЬ ПЛАЗМЫ КРОВИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПАЦИЕНТОВ С ЦЕРЕБРОВАСКУЛЯРНОЙ ПАТОЛОГИЕЙ ГОЛОВНОГО МОЗГА

Показано, что морфологический анализ в совокупности с методом ИКС позволяет с высокой чувствительностью и специфичностью выявлять опухолевый процесс, так как этот процесс меняет ИК-спектры многих органических молекул. Поэтому исследование особенностей ИК-спектров биологических жидкостей может быть важным дополнением для развития эффективных и безопасных методов диагностики и лечения пациентов с цереброваскулярной патологией головного мозга.

Цереброваскулярные заболевания (ЦВЗ) – одна из наиболее актуальных проблем современной медицины. В последние годы в структуре ЦВЗ из хронических форм нарушения мозгового кровообращения преобладает дисциркуляторная энцефалопатия (ДЭ). Транзиторная ишемическая атака (ТИА) существенно повышает риск развития повторного нарушения мозгового кровообращения – ТИА и ишемического инсульта. В патогенезе церебральной ишемии основную роль играют атеросклеротическое поражение сосудов, артериальная гипертензия и сахарный диабет. Важное значение имеет нарушение микрогемодиализации, вызванное дисрегуляцией сосудистого тонуса, повышенной активацией тромбоцитов и вязкостью крови [1].

Биологические жидкости (БЖ) – универсальный объект для изучения динамики физиологических и патологических процессов в организме. Одним из способов, позволяющих провести оценку метаболических изменений в крови, в том числе и при ЦВЗ, является метод клиновидной дегидратации, в ходе которого при переходе БЖ в твердую фазу в процессе самоорганизации (дегидратации) происходит структурирование и образование устойчивых морфологических форм. Фация (пленка, полученная при высыхании БЖ) представляет собой структурное изображение крови (плазмы), ее молекулярные взаимоотношения и протекающие в ней патологические процессы [2].

Целью работы является выявление особенности структуризации дегидратирующих капель цельной крови и плазмы у пациентов с ДЭ и ТИА.

Объектом исследования была цельная кровь и плазма пациентов с ДЭ и ТИА. Образцы готовили по следующей методике. Каплю цельной крови, плазмы наносили на поверхность тщательно промытой подложки из полиметилметакрилата с помощью микропипетки. Объем капли составлял 10 мкл. Процесс сушки проходил при температуре 20–25 °С и относительной влажности воздуха 60–65 % в течение 90–120 минут. Для получения снимков использовали оптический микроскоп Биолам (Россия) со светодиодной подсветкой и веб-камерой.

Для получения спектров ИК поглощения фаций плазмы крови использовался Фурье-спектрометр Vertex 70 фирмы Bruker. Образцы плазмы крови в объеме 3 мкл наносили на подложку из стекла КРС-5 и высушивали в течение часа при комнатной температуре.

Морфология центральной части высохшей капли крови (1) и плазмы крови (2) пациентов до лечения представлена на рисунке 1. Для демонстрации полученных результатов использовали цельную кровь и плазму двух пациентов с ДЭ (*а, б*) и двух пациентов ТИА (*в, г*).

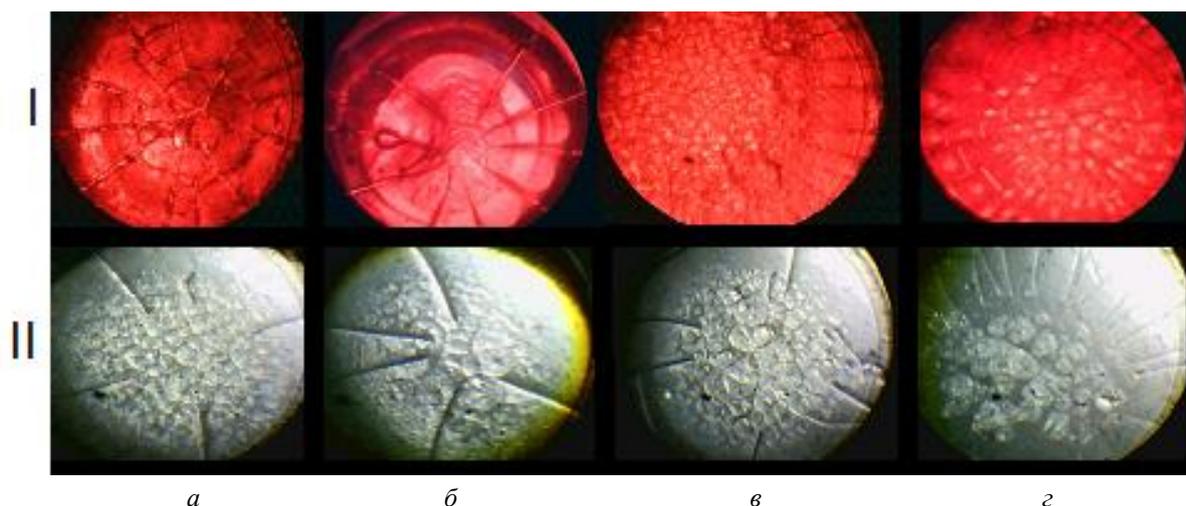


Рисунок 1 – Снимок фации цельной крови и плазмы пациентов

Качественный сравнительный анализ структуры поверхности образцов цельной крови показал, что у пациентов с ЦВЗ имеются различия: у пациентов с ДЭ образуется радиальное растрескивание капли; при ТИА наблюдается радиальное растрескивание фации по периферии с образованием конкреций и отдельностей, а в центральном ореоле происходит расщепление на мелкие трещины.

Одним из фундаментальных методов исследования органических веществ, который широко используется в химии, биологии и медицине, является инфракрасная (ИК) спектроскопия. Потенциальным возможностям ИК-спектроскопии для диагностики посвящено большое количество работ [3]. ИК-спектроскопия не только используется в клинической лабораторной диагностике в настоящее время, но и характеризуется высоким потенциалом обнаружения ранних биохимических отклонений при развитии патологического процесса [3].

При использовании спектров ИК поглощения исследования проводили в области спектра 4000–400 см^{-1} . Наиболее информативной областью является область 1200–950 см^{-1} [3]. Эта область позволяет выявить весь спектр веществ в плазме крови, содержащих связи P–O и C–O, простые и сложные эфирные связи C–OO, P–OO, к которым относятся все липиды, фосфорилированные белки, углеводы и другие соединения. Наличие amino- и карбоксильных групп позволяет широко использовать его конформационную динамичность, обуславливающую структурные перестройки и его способность к агрегации с образованием коагулирующих центров.

На рис. 2 приведен ряд спектров образцов высохших капель плазмы крови пациентов до и после операции.

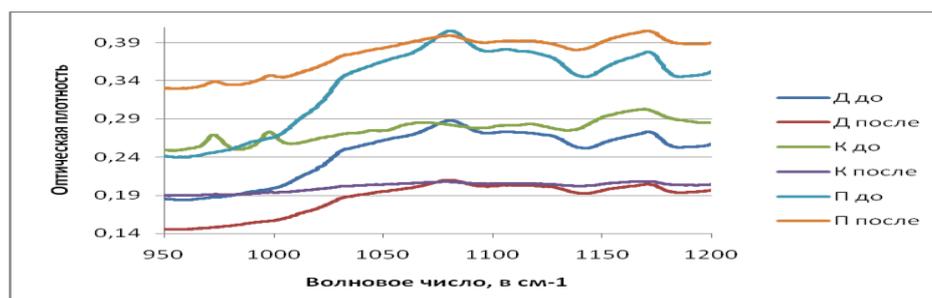


Рисунок 2 – Спектры ИК поглощения образцов плазмы крови пациентов в области 950–1200 см^{-1}

Из рисунка видно, что соотношения интенсивностей полос в ИК-спектрах пациентов до и после операции заметно различаются.

Применительно к настоящим исследованиям аналитически информативными являются полосы поглощения ИК-спектра, соответствующие связям фосфор-кислород (P–O) фосфорсодержащих соединений [3]. Однако вопрос идентификации фосфорсодержащих соединений плазмы крови методом ИК-спектроскопии до сих пор остается открытым.

С наибольшей вероятностью следует считать, что в ИК-спектре плазмы крови определяются полосы поглощения P–O связей: неорганических фосфатов, фосфолипидов (фосфатидилхолин, фосфатидилэтаноламин,

фосфатидилинозитол), фосфорилированных белков, фосфора кислоторастворимого эритроцитарного (нуклеозидтри- (ди-, моно-) фосфорных кислот и их производных). Увеличение их концентрации в крови отмечается при определенных патологиях, например, почечной недостаточности, передозировке витамина Д, недостаточности парацитовидных желёз, при миеломных болезнях, нарушениях липидного обмена (липидный фосфор) и т. д. Количество кислоторастворимого фосфора увеличивается при всех заболеваниях, сопровождающихся кислородной недостаточностью.

Метод ИКС позволяет с высокой чувствительностью и специфичностью выявлять не только разные РНК, белки, но и жиры, углеводы в плазме крови. Опухолевый процесс меняет ИК-спектры многих органических молекул. Поэтому исследование особенностей ИК-спектров БЖ может быть важным дополнением для развития эффективных и безопасных методов диагностики и лечения онкологических заболеваний.

Список литературы

1. Максимов, С. А. Морфология твердой фазы биологических жидкостей как метод диагностики в медицине / С. А. Максимов // Бюллетень сибирской медицины. – 2007. – № 4. – С. 80–85.
2. Бузовера, М. Э. Экспериментальное исследование микроструктур фаций сывороточного альбумина / М. Э. Бузовера, Ю. П. Щербак, И. В. Шишпор // ЖТФ. – 2012. – Т. 82, вып. 9. – С. 87–94.
3. Инфракрасная спектроскопия сыворотки крови в диагностике онкозаболеваний / Р. Н. Комаров [и др.] // Нижегород. мед. журн. – 2006. – № 1. – С. 98–100.

The paper shows that morphological analysis in conjunction with the ICS method allows for high sensitivity and specificity to identify tumor process, since this process changes the IR spectra of many organic molecules. Therefore, the study of the characteristics of the IR spectra of biological fluids can be an important addition to the development of effective and safe methods of diagnosis and treatment of patients with cerebrovascular pathology of the brain.

Прокопенко Татьяна Анатольевна, аспирантка кафедры радиобиологии Международного государственного экологического института имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.

Научные руководители – *Нечипуренко Наталья Ивановна*, доктор медицинских наук, профессор, заведующий лабораторией РНПЦ неврологии и нейрохирургии, Минск, Беларусь.

Зажогин Анатолий Павлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, zajogin_an@mail.ru.

УДК 544.35-165.02/.03:546.711'72'74'289

Г. С. РИМСКИЙ

КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ $Mn_{1-x}Ti_xNiSb$ ($0,00 \leq x \leq 0,50$)

Впервые получены твердые растворы $Mn_{1-x}Ti_xNiSb$ в диапазоне концентраций $0,00 \leq x \leq 0,50$. Изучены кристаллические свойства и удельная намагничённость твердых растворов $Mn_{1-x}Ti_xNiSb$. Определены параметры элементарной кристаллической ячейки, температуры разрушения магнитного состояния.

Полугейслеровские соединения, представляют интерес не только для фундаментальной науки, но и возможностью их практического применения, благодаря наличию таких эффектов как, магнитострикция, магнитосопротивление, магнитокалорический эффект, индуцированный магнитным полем эффект памяти формы [1–3]. К таким материалам относится $MnNiSb$. Он обладает 100 %-й спиновой поляризацией на уровне Ферми. Высокая температура Кюри, большая намагничённость и спиновая поляризация делают его идеальным кандидатом для спинтронных устройств [4]. С другой стороны, температура Кюри слишком высока, чтобы $MnNiSb$ можно было использовать в качестве магнитного холодильного материала при комнатной температуре и выше диапазона необходимого для термомагнитной генерации. Обзор литературных источников показал, что влияние магнитного поля, температуры, давления и легирования на физические свойства $MnNiSb$ остается мало изученным.

Цель работы – синтез твердых растворов $Mn_{1-x}Ti_xNiSb$ в диапазоне концентраций $0,00 \leq x \leq 0,50$ и изучение особенностей их кристаллической структуры и магнитных свойств.

Методы эксперимента. Образцы полукристаллических порошков $Mn_{1-x}Ti_xNiSb$ с шагом по концентрации 10 мол.% получены методом прямого сплавления исходных компонентов в вакуумированных кварцевых ампулах в однозонной печи сопротивления с последующей закалкой в воду со льдом. Фазовый состав и параметры элементарной кристаллической ячейки составов определены в $Cu\ K\alpha$ -излучении при комнатной температуре. Температурные зависимости удельной намагниченности изучены пондероторным методом в магнитном поле с индукцией 0,86 Тл в интервале температур $80 \leq T \leq 850$ К.

Результаты и обсуждение. На рисунке 1 представлены рентгенограммы порошков твердых растворов $Mn_{1-x}Ti_xNiSb$ составов $0,00 \leq x \leq 0,50$ в диапазоне углов $20^\circ \leq 2\theta \leq 115^\circ$.

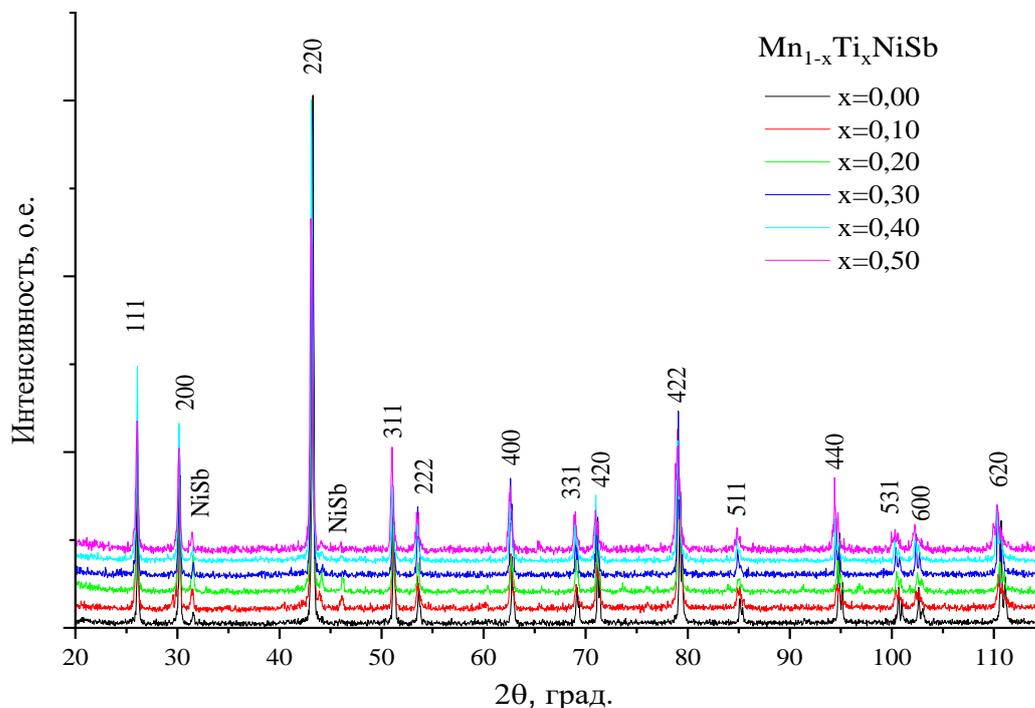


Рисунок 1 – Рентгенограммы порошков твердых растворов $Mn_{1-x}Ti_xNiSb$ составов $0,00 \leq x \leq 0,50$

Установлено, что на рентгенограммах порошков $Mn_{1-x}Ti_xNiSb$, кроме кубической сингонии типа $MgAgAs$ пространственной группы $F-43m$, присутствуют три рефлекса слабой интенсивности антимонида никеля (NiSb).

В таблице 1 приведены численные значения параметра a , величины объемов элементарных ячеек V и рентгеновская плотность $\rho_{рен}$ порошков исследуемых составов.

Таблица 1 – Численные значения параметра a , величины объемов элементарных ячеек V и рентгеновская плотность $\rho_{рен}$ порошков твердых растворов $Mn_{1-x}Ti_xNiSb$

x	a , нм	V , 10^{-2} нм ³	$\rho_{рен}$ (г/см ³)
0,00	0,592(6)	20,80(9)	3,75(7)
0,10	0,593(3)	20,88(3)	3,73(1)
0,20	0,593(5)	20,90(2)	3,71(7)
0,30	0,593(8)	20,93(4)	3,69(9)
0,40	0,594(2)	20,97(9)	3,68(1)
0,50	0,594(5)	20,09(7)	3,66(4)

Концентрационные зависимости параметра $a = f(x)$ и рентгеновской плотности образцов твердых растворов $Mn_{1-x}Ti_xNiSb$ приведены на рисунке 2. Скачок параметра a при $x = 0,10$, можно объяснить различием ионных радиусов Mn и Ti. Дальнейшее изменение параметра a элементарной кристаллической ячейки в интервале концентраций $0,10 \leq x \leq 0,50$ в соответствии с правилом Вегарда, линейный вид зависимости изменения плотности от концентрации, типичны для интервала концентрации существования твердых растворов замещения.

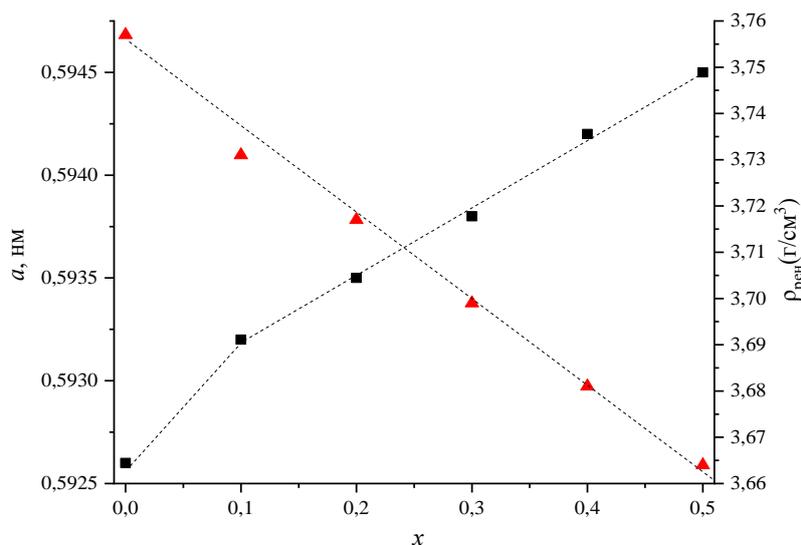


Рисунок 2 – Концентрационные зависимости параметра элементарной ячейки a (ρ) и рентгеновской плотности (Δ) твёрдых растворов $\text{Mn}_{1-x}\text{Ti}_x\text{NiSb}$ составов $0,00 \leq x \leq 0,50$

Результаты измерений удельной намагниченности исследуемых составов представлены на рисунке 3.

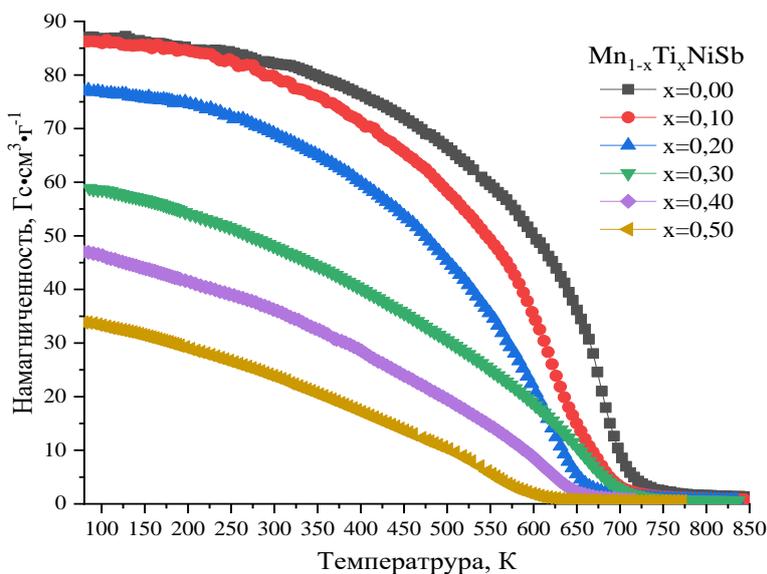


Рисунок 3 – Температурные зависимости намагниченности порошковых образцов твёрдых растворов $\text{Mn}_{1-x}\text{Ti}_x\text{NiSb}$ при нагреве в магнитном поле 0,86 Тл

Увеличение содержания титана в твердых растворах приводит к уменьшению намагниченности. Величины удельной намагниченности и средних магнитных моментов при 80 К, температуры разрушения упорядоченного магнитного состояния твердых растворов $\text{Mn}_{1-x}\text{Ti}_x\text{NiSb}$ представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Численные значения параметра a , величины объёмов элементарных ячеек V и рентгеновская плотность $\rho_{\text{рен}}$ порошков твёрдых растворов $\text{Mn}_{1-x}\text{Ti}_x\text{NiSb}$

x	$\sigma_{80\text{K}}, \text{Гс}\cdot\text{см}^3\cdot\text{г}^{-1}$	T_C, K	$\mu_{80\text{K}}, \mu_B$
0,00	87,06	698	3,67
0,10	86,26	647	3,62
0,20	77,21	630	3,23
0,30	58,87	666	2,46
0,40	46,94	622	1,95
0,50	33,84	570	1,40

Концентрационные зависимости температуры Кюри и намагниченности при 80 К образцов твердых растворов $Mn_{1-x}Ti_xNiSb$ приведены на рисунке 4.

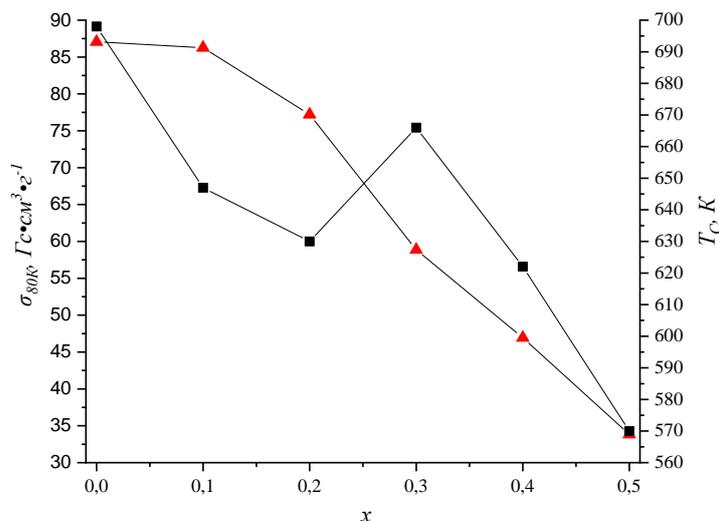


Рисунок 4 – Концентрационные зависимости температуры Кюри (T) и намагниченности при 80 К (Δ) твёрдых растворов $Mn_{1-x}Ti_xNiSb$

Методом синтеза в твердотельной фазе впервые получены образцы твердых растворов $Mn_{1-x}Ti_xNiSb$ в диапазоне концентраций $0,00 \leq x \leq 0,50$. Определены сингония, пространственная группа, параметры и объем элементарной ячейки, температура Кюри и средние магнитные моменты при 80 К. Установлено, что с увеличением концентрации титана параметр кристаллической ячейки линейно увеличивается после $x = 0,10$, а удельная намагниченность уменьшается.

Список литературы

1. Gschneidner, Jr. K. A. Recent developments in magnetocaloric materials / Jr. K. A. Gschneidner, V. K. Pecharsky, A. O. Tsokol // Rep. Prog. Phys. – 2005. – Vol. 68. – P. 1479–1539.
2. Giant magnetoresistance effects in intermetallic compounds (invited) / V. Sechovský [et al.] // J. Appl. Phys. – 1994. – Vol. 76. – P. 6913–6918.
3. Magnetic superelasticity and inverse magnetocaloric effect in Ni-Mn-In / T. Krenke [et al.] // Phys. Rev. B. – 2007. – Vol. 75. – P. 104414(1–4).
4. Magnetic hyperfine field on Cd in the $Ni_{1+x}MnSb$ alloy / J. Schaf [et al.] // Hyperfine Interactions. – 1978. – Vol. 4. – P. 397–401.

For the first time, solid solutions of $Mn_{1-x}Ti_xNiSb$ were obtained in the concentration range of $0,00 \leq x \leq 0,50$. The crystal properties and specific magnetization of $Mn_{1-x}Ti_xNiSb$ solid solutions were studied. The parameters of an elementary crystal cell and the temperature of destruction of the magnetic state are determined.

Римский Григорий Семенович, НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь, gimskij@physics.by.

Научный руководитель – Янушкевич Казимир Иосифович, доктор физико-математических наук, НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь.

УДК 535.391:621.376

Е. О. СЕМЕНЧУК

ИССЛЕДОВАНИЕ РАННИХ СТАДИЙ НАГРЕВАНИЯ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТЬ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Проведен расчет изменения температуры на поверхности облучаемого образца при действии на его поверхность серии пиков лазерного излучения с интервалами 1 мкс (что соответствует реальной форме импульса свободной генерации рубинового лазера). Получен график зависимости температуры поверхности облучаемого образца $T(\vec{r}, t)$.

Проведен расчет изменения температуры $T(\vec{r}, t)$ на поверхности образца из полиметилметакрилата (ПММА), подвергаемого воздействию лазерного излучения. Численно решалось уравнение

$$\frac{dT(\vec{r}, t)}{dt} = a^2 \Delta T(\vec{r}, t) + f(\vec{r}, t)$$

с начальными условиями

$$T(\vec{r}, t) = T_0 = 300 \text{ K}$$

и граничным условием

$$(n \cdot \text{grad } T(\vec{r})) = 0,$$

которое задавалось на реальной границе облучаемого образца – диска с толщиной l_a и радиусом R_{d1} с плоской поверхностью.

Функция источника $f(\vec{r}, t)$ имела в пределах пятна фокусировки радиально симметричный вид

$$f(\vec{r}, t) = \begin{cases} 0, \theta > \theta_0 \\ b\alpha(t)\delta(r - R_0), \theta \leq \theta_0 \end{cases}$$

где $b = \frac{E}{a^2} \cdot \frac{1 - \rho_{от}}{c\sqrt{\alpha t}}$; энергия импульса E ; удельная теплоемкость c ; длительность импульса τ ; функция $\alpha(t)$ – нормированная временная зависимость энергии в воздействующем лазерном импульсе; $\rho_{от}$ – коэффициент отражения; $\theta = \arcsin\left(\frac{4dh_0}{(4h_0^2 + l_0^2)}\right)$; $\delta(x)$ – дельта-функция Дирака.

Подобная модель не учитывает затрат энергии на испарение и горение полиметилметакрилата, и ряд других процессов, протекающих как в облучаемом образце, так и у его поверхности. Тем не менее подобная модель может быть использована для качественного описания нагревания пластика, по крайней мере в случае небольшого числа воздействующих на образец пичков ($n_p \leq 8$) лазерного излучения.

Для рассматриваемого случая уравнение теплопроводности имеет аналитическое решение

$$\begin{aligned} \Delta T(t, z, r) = & b \frac{d^2}{16l} \left(t_1 + \sum_{i=2}^{\infty} \frac{8}{K_i d} J_1\left(\frac{K_i d}{2}\right) \cdot \frac{e^{-K_i^2 a^2 t}}{K_i^2 a^2} (e^{K_i^2 a^2 t_1} - 1) J_0(K_i r) \right) + \\ & + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\frac{\pi^2 n^2 a^2 t_1}{l^2}}}{\frac{\pi^2 n^2 a^2}{l^2}} \left(e^{\frac{\pi^2 n^2 a^2 t_1}{l^2}} - 1 \right) \cos\left(\frac{\pi n}{l} z\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=2}^{\infty} \frac{8}{d \sqrt{K_i^2 - \frac{\pi^2 n^2}{l^2}}} \times \\ & \times J_1\left(\frac{d}{2} \sqrt{K_i^2 - \frac{\pi^2 n^2}{l^2}}\right) \frac{e^{-K_i^2 a^2 t}}{K_i a^2} (e^{K_i^2 a^2 t_1} - 1) \times \\ & \times \cos\left(\frac{\pi n}{l} z\right) J_0\left(\sqrt{K_i^2 - \frac{\pi^2 n^2}{l^2}} \cdot r\right), \\ & t_1 = \begin{cases} t, t < \tau \\ \tau, t \geq \tau \end{cases} \end{aligned}$$

где K_i определяется из уравнений $J_1(K_i R) = 0$ в первой сумме и

$$J_1\left(\sqrt{K_i^2 - \frac{\pi^2 n^2}{l^2}} \cdot R\right) = 0$$

в третьей сумме. Здесь $J_0(x)$, $J_1(x)$ – функции Бесселя; z , r – расстояния до точки, в которой определяется температура T , вдоль оси системы и в направлении, нормальном к оси системы соответственно.

Для определения K_i применялись следующие данные [1]:

Таблица 1 – Функции Бесселя порядков 0, 1

x	$J_0(x)$	$J_1(x)$
0	1.000	0
0.1	0.997	0.049
0.2	0.990	0.099
0.3	0.977	0.148
0.4	0.960	0.196
0.5	0.938	0.242
0.6	0.917	0.268
0.7	0.881	0.328
0.8	0.846	0.368
0.9	0.807	0.405
1.0	0.765	0.440

Список литературы

1. Абрамовиц, М. Справочник по специальным функциям / М. Абрамовиц, И. Стиган. – М. : Наука, 1979. – 208 с.

A calculation was made of the temperature change on the surface of the irradiated sample under the action of a series of spikes of laser radiation on its surface at 1 μ s intervals (which corresponds to the real shape of the ruby laser free pulse). A graph of the surface temperature of the irradiated sample $T(\vec{r}, t)$ is obtained.

Семенчук Евгений Олегович, аспирант 1-го года обучения физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, Unata1976-2010@mail.ru.

Научный руководитель – *Иванов Алексей Юрьевич*, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, ion_ne@mail.ru.

УДК 53

А. Л. СИТКЕВИЧ

МОДИФИКАЦИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МЕДИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Методом рентгеновской дифрактометрии обнаружено изменение кристаллической структуры меди в зоне воздействия на ее поверхность лазерного излучения с плотностью потока 10^4 – 10^5 Вт/см². Показано, что при действии лазерного излучения на поверхность металлических образцов их кристаллическая структура меняется в облученной зоне с кубической гранецентрированной на искаженную (имеющую форму параллелепипеда, отличную от куба).

В последнее время технологии лазерной обработки уделяется повышенное внимание, поскольку она является эффективным, а главное, результативным методом. Сфера ее применения очень широка: поверхностное упрочнение металлов, микрообработка материалов, модификация свойств и поверхности, лазерная резка и сварка и т. д. В связи с этим возникает необходимость в изучении процессов, протекающих при лазерной обработке твердого тела. Замечено, что при упрочнении материала посредством лазерной обработки свойства основного материала остаются неизменными, в то время как твердость поверхности растет. Однако не наблюдается ни изменение состава вещества, ни, как правило, выраженных фазовых переходов 1-го рода. Объяснения таких изменений следует искать в особенностях протекания процесса изменения структуры вещества, прошедшего лазерную обработку.

Исследования проводились на экспериментальном лазерном оборудовании, схема которого приведена на рисунке 1.

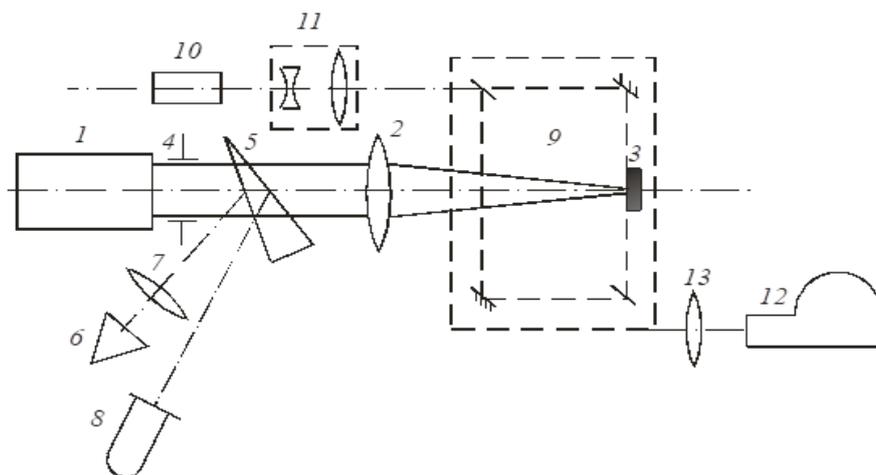


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Цифрой «1» обозначен источник лазерного излучения (ЛИ) – рубиновый лазер ГОР–100 М (с длиной волны $\lambda = 0,694$ мкм) работающий в режиме свободной генерации (длительность импульса $\tau \sim 1,2$ мс). Цифрой «2» обозначена фокусирующая система, пройдя через которую, ЛИ направлялось на образец 3, располагавшийся в кювете с водой. В качестве фокусирующих использовались как однолинзовые, так и двухлинзовые системы, что позволяло строить изображение диафрагмы 4 на поверхности образца 3 в виде пятна с резкими краями (диаметр варьировался в ходе экспериментов от 1 до 2 мм), что, в свою очередь, обеспечивало изменение плотности потока излучения q от 10^4 до 10^6 Вт/см².

Часть (~ 4 %) ЛИ направлялась передней гранью стеклянного клина в измеритель энергии ИМО-2Н, входной зрачок которого был расположен в фокальной плоскости линзы. Энергия лазерных импульсов E_0 варьировалась в пределах от 5 до 60 Дж. Отраженное задней гранью клина излучение направлялось на коаксиальный фотоэлемент ФЭК-14, сигнал с которого подавался на вход осциллографа С8, и использовался для регистрации временной формы лазерного импульса.

Для определения структурных изменений образцов из металла (сплошные поликристаллические), в равновесном состоянии имеющих кубическую гранецентрированную кристаллическую решетку, до и после воздействия лазерного излучения, использовался рентгеновский дифрактометр ДРОН-2.0. В дифрактометре использовалось излучение линии K_α от трубки с медным антикатодом, фильтрованное никелевым стандартным фильтром на длине волны 154,050 пм.

При взаимодействии ЛИ с веществом может произойти целый ряд изменений в обрабатываемом образце: кристаллохимические превращения, способные привести к изменению химического свойства вещества; фазовые переходы; появление дефектов новых типов и увеличение концентрации уже существующих; изменение свойств межкристаллических областей. Рассмотрим действие лазерного излучения на образец из меди Cu (структурный тип А1). Этот структурный тип относится к пространственной группе Fm3m и обладает кубической гранецентрированной (ГЦК) элементарной ячейкой, т. е. описывается одним параметром $a = b = c$, так как все угловые параметры известны: $\alpha = \beta = \gamma$. Поскольку медь не имеет других фаз, кроме той, что описывается группой Fm3m, можно сказать, что первые два механизма изменений в данном случае не способны привести к изменениям, которые можно было бы зарегистрировать методами рентгеновской дифрактометрии. Кроме того, в нашем случае энергии лазерного излучения недостаточно для ионизации остова, и, следовательно, ни межъядерные расстояния, ни энергия Ферми не изменяются. Значит, необходимо выяснить, влияет ли облучение на дефектность структуры кристалла меди.

На рисунке 2 представлены корреляционные функции $P(u)$ для медных образцов. Видно, что для облученных образцов меди при $q \sim 5 \cdot 10^5$ Вт/см² наблюдается не только размытие, но и расщепление первого максимума распределения. Это свидетельствует о том, что после лазерной обработки трансформируется кристаллическая структура. Стоит также отметить, что при плотностях потока ЛИ, достаточных для плавления металла в зоне обработки ($q > 10^6$ Вт/см²) изменение дифрактограмм не наблюдалось, а микротвердость немного уменьшалась.

Оценивая высоту первого максимума корреляционных функций до и после облучения, получено, что трансформации подвержено 83 % ячеек. Эти данные хорошо согласуются с расчетными.

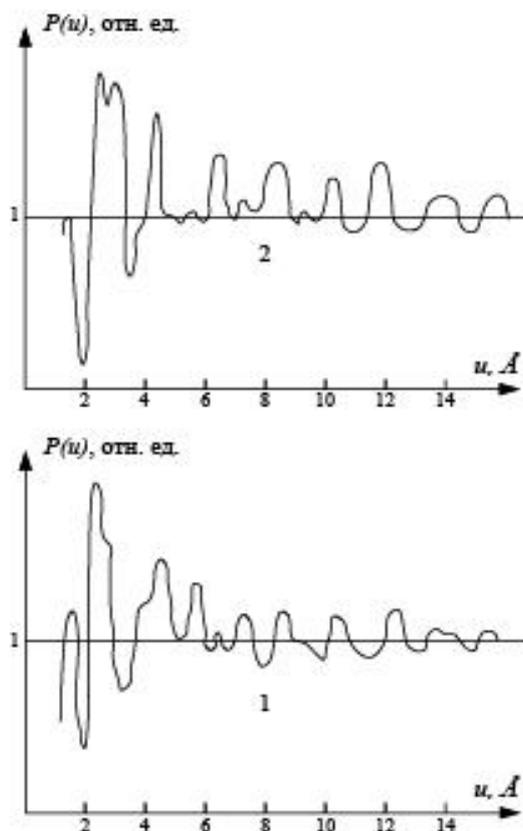


Рисунок 2 – Корреляционные функции $P(u)$ для медных образцов: 1) до облучения, 2) после лазерного облучения [1]

Для оценки доли ячеек, изменивших свое состояние, использовалась следующая методика.

Прежде всего, выясним, какое число ячеек находится в зоне облучения. Для этого необходимо знать объем образца и объем одной ячейки. Поскольку кристалл меди относится к пространственной группе $Fm\bar{3}m$ и обладает кубической гранецентрированной (ГЦК) элементарной ячейкой, т. е. описывается одним параметром $a = b = c$ ($\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$), то объем ячейки до обработки можно считать равным

$$V_{\text{cell}} = a^3 = (3,597 \cdot 10^{-10} \text{ м})^3 = 4,65 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3.$$

Для расчета объема образца необходимо принять во внимание следующие факты. Во-первых, лазерное излучение не может проникнуть вглубь образца на глубину превышающую длину волны. Во-вторых, по ширине ЛИ не может выйти за границы пятна фокусировки. Поэтому, в качестве исследуемого образца будем рассматривать цилиндр с высотой, равной длине волны рубинового лазера ($h = \lambda = 0,694 \text{ мкм}$), и диаметром, равным диаметру пятна фокусировки ($d = 2 \text{ мм}$). В таком случае объем образца можно найти следующим образом:

$$V_{\text{Cu}} = \frac{\pi d^2}{4} \lambda = 2,17 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3.$$

А значит, число ячеек, приходящихся на исследуемый объем, равно:

$$N_{\text{cell}} = \frac{V_{\text{Cu}}}{V_{\text{cell}}} = 4,65 \cdot 10^{16} \text{ ячеек.}$$

Затем выясним, сколько ячеек смогло бы трансформироваться в параллелепипеды, если бы вся энергия воздействующего пучка тратилась на разрушение ячейки.

Для начала найдем энергию кристаллической решетки в основном состоянии. Учтем, что расположение атомов в структурном типе меди соответствует кубической (трёхслойной) плотнейшей шаровой упаковке одинаковых атомов. Координационное число каждого атома – 12, координационный полиэдр – кубооктаэдр. Для решеток с такой структурой характерно наличие в узлах атомов и ионов, образованных за счет отрыва электронов. Взаимодействие между атомами в кристалле не ограничивается только ближайшими соседями, оно может распространяться на значительно большие расстояния (вплоть до всего кристалла в целом). В связи с

этим энергию кристаллической решетки можно считать состоящей из кинетической энергии электронов проводимости и потенциальных энергий взаимодействия атомных остовов с электронами проводимости, а также из энергии других видов взаимодействия между атомными остовами. Таким образом, минимума энергии можно достигнуть при условии равновесия кристалла, т. е. равенства нулю всех сил, действующих на кристалл. Согласно методике [2–4] нами была рассчитана энергия кристаллической решетки исследуемых образцов:

$$E_{\text{cell}} = \frac{3}{5} E_F = \frac{3}{5} \frac{\hbar^2}{2m_e} \left(\frac{3\pi^2 \rho N_A}{\mu} \right)^{\frac{2}{3}} = 4,14 \text{ эВ},$$

где E_F – энергия Ферми, \hbar – постоянная Планка, m_e – масса электрона, ρ – плотность меди, N_A – постоянная Авагадро, μ – молярная масса меди.

Определим число ячеек, способных изменить кристаллическую структуру в облученной области с кубической гранцентрированной на тетрагональную.

$$N_{\text{trans}} = \frac{E_{\text{abs}}}{E_{\text{cell}}} = \frac{3,12 \cdot 10^{19}}{4,14} = 7,53 \cdot 10^{18} \text{ ячеек},$$

где E_{abs} – энергия поглощения (5 Дж).

Однако следует учесть, что не вся энергия лазерного пучка поглощается. Часть отражается, преломляется и рассеивается, и лишь оставшаяся энергия (~0,5 %) проникает внутрь образца, поглощается и переходит в тепло. Таким образом, реальное число ячеек, способных изменить кристаллическую структуру будет порядка $3,77 \cdot 10^{16}$ ячеек, что составляет 81 % от общего числа ячеек.

Проведенные исследования показали, что при действии лазерного излучения на поверхность образцов меди их кристаллическая структура меняется в облученной зоне с кубической гранцентрированной на искаженную (имеющую форму параллелепипеда, отличную от куба).

Список литературы

1. Васильев, С. В. Изменение кристаллической структуры металлов под воздействием лазерного излучения / С. В. Васильев, А. Ю. Иванов, В. А. Лиопо // Инженерно-физический журнал. – 2007. – Т. 80, № 5. – С. 12–18.
2. Жданов, Г. С. Лекции по физике твердого тела: Принципы строения, реальная структура, фазовые превращения / Г. С. Жданов, А. Г. Хунджа. – М. : Изд-во МГУ, 1988. – 231 с.
3. Павлов, П. В. Физика твердого тела : учеб. / П. В. Павлов, А. Ф. Хохлов. – Изд. 3-е. – М. : Высш. шк., 2000. – 494 с.
4. Зиненко, В. И. Основы физики твердого тела / В. И. Зиненко, Б. П. Сорокин, П. П. Турчин. – М. : Изд-во физ.-матем. лит., 2001. – 335 с.

The changes of crystalline structure of metal (Cu) in the zone of action on metal surface of laser radiation with flux density 10^4 – 10^5 W cm⁻² was detected by means of x-ray diffractometry. It was shown that after laser treating of the surface of metal samples their crystalline structure in the irradiated zone changed from cubic facet-centralized to distorted (having the form of parallelepiped different from cub).

Ситкевич Анастасия Леонидовна, аспирант 3-го года обучения физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, girl-physicist@mail.ru.

Научный руководитель – *Иванов Алексей Юрьевич*, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, ion_ne@mail.ru.

УДК 538.9

Ю. О. СКАВЫШ, А. В. ЛЕЩИНСКАЯ, А. С. ГРИГОРЬЕВ

РЕЛАКСАЦИОННЫЙ ПРОЦЕСС В СТРУКТУРИРОВАННОЙ ВОДЕ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ФАЗ

Представлены результаты исследования релаксационного процесса в деионизованной воде, подверженной влиянию электрического поля, на границе раздела «металл-раствор». Определена энергия активации процесса релаксации в воде, структурированной электрическим полем двойного электрического слоя.

При производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем широко используются различные технологические операции, связанные с использованием деионизованной воды. В частности, промывка в воде является одной из ключевых технологических операций, связывающих, например,

предыдущие и последующие обработки кремниевых пластин. Высокая «отмывающая» способность воды, а также ее высокая активность как растворителя, являются следствием двух аспектов: – дипольного характера молекул воды; – высокой диэлектрической проницаемости воды.

При электрохимических исследованиях необходимо учитывать, что на границе раздела «металл-раствор» или «полупроводник-раствор» формируется двойной электрический слой (ДЭС) [1]. Этот слой со стороны раствора часто называют слоем Гуи – Гельмгольца. Этот слой характерен тем, что в нем существуют значительные электрические поля с напряженностью многие сотни и тысячи вольт/см. Электрическое поле ДЭС неизбежно влияет на ориентацию молекул воды, имеющих дипольную структуру. Это же поле способствует не только ориентации молекул воды друг относительно друга, но и их адсорбции на границе раздела.

Направление электрического поля, во-первых, и его величина, во-вторых, определяется величиной и знаком потенциала гальвани, возникающего на границе раздела «электрод-раствор». В свою очередь, направление электрического поля и его величина зависят от разницы значений энергии Ферми в электроде, RedOx-энергии в растворе.

Например, если электрическое поле ДЭС направлено вглубь раствора, то в ДЭС молекулы воды, как диполи, будут ориентированы преимущественно так, что атомы кислорода будут находиться ближе к границе раздела, нежели атомы водорода. При этом в ДЭС молекулы воды, по вполне естественным причинам, теряют часть своих степеней свободы (как поступательных, так и вращательных). Иными словами, молекулы воды в ДЭС становятся жестче связаны, чем молекулы воды, находящиеся за пределами ДЭС.

Указанные особенности изменения структуры воды за счет влияния электрического поля ДЭС неизбежно должны приводить к изменению вязкости воды, диэлектрической проницаемости, электропроводности и иных физических и физико-химических свойств.

При выполнении экспериментальных исследований использовалась деионизованная вода, произведенная на ОАО «Интеграл», г. Минск. Исследования проводились при нормальных условиях измерительным прибором E7-25 (производство ОАО «МНИПИ» г. Минска) в диапазоне частот от 25 Гц до 1 МГц. Основным параметром, несущим максимальное количество информации о свойствах изучаемых объектов, является тангенс угла потерь ($\text{tg}\delta$) [2]. Возможно использование для объяснения получаемых результатов иных параметров: добротности, угла сдвига фаз (ϕ), параметров параллельной и последовательной эквивалентных RC-цепей. Эти параметры несут дополнительную информацию, но в данной работе не приведены.

Для обеспечения формирования ДЭС и его электрического поля мы использовали датчики конденсаторного типа. Особенностью этих датчиков является то, что на их металлической части отсутствует слой изоляционного покрытия. Благодаря этому и формируется ДЭС. В качестве металла электродов датчика мы использовали медь, никель, цинк, нержавеющей сталь, платину. В материалах данной работы мы представили результаты регистрации $\text{tg}\delta$ только для датчика, изготовленного из платины.

Использовались датчики двух конструкций:

1. Расположенные параллельно друг другу металлические пластины как одинаковой, так и разной площади. Расстояние между пластинами могло регулироваться путем установки между ними дистанционных диэлектрических шайб и могло изменяться в пределах 0,1–10 мм.

2. Спиралевидный наружный электрод, внутрь которого был вставлен штыревой электрод.

В работе [2] было показано, что численные значения $\text{tg}\delta$ не зависят ни от конструкции, ни от геометрических размеров датчика.

На рисунке 1 представлена зависимость $\text{tg}\delta$ от частоты при использовании датчика конструкции 2, изготовленного из платины. Зависимость носит ярко выраженный экстремальный характер, при этом на частоте около 500 Гц значение $\text{tg}\delta$ достигают 35 единиц. Как при увеличении, так и при уменьшении частоты значение $\text{tg}\delta$ уменьшаются. При увеличении частоты до 10^5 Гц и более численными значениями $\text{tg}\delta$ по сравнению с 35 единицами, очевидно, можно пренебречь. При понижении частоты также наблюдается уменьшение $\text{tg}\delta$, однако, использованный нами измеритель иммитанса E7-25 не позволяет «опуститься» по частоте ниже 25 Гц: «заглянуть» в эту область частот не удастся.

Для выяснения причины очень больших значений $\text{tg}\delta$ было сделано следующее: осуществлена регистрация $\text{tg}\delta$ при двух значениях измерительного синусоидального напряжения: 40 мВ и 700 мВ. Это напряжение приложено между двумя электродами датчика.

Мы предполагали, что значительное значение $\text{tg}\delta$ по сравнению со спиртами в вышеупомянутой работе связаны с потерями энергии. Эти потери предположительно должны были быть обусловлены фарадеевскими процессами на границе раздела «металл-раствор»: окисление и восстановление воды из молекулярной формы (H_2O) и ее продуктов самодиссоциации (H^+ и OH^-).

Однако, как видно из рисунка 1, величина измерительного напряжения, меняющаяся почти в 20 раз, практически не оказывает влияния на зависимости $\text{tg}\delta$ от частоты: зависимости практически совпадают друг с другом. Следовательно, ожидаемая роль фарадеевских процессов (потерь энергии на электролиз воды) в нашем эксперименте не выявляется.

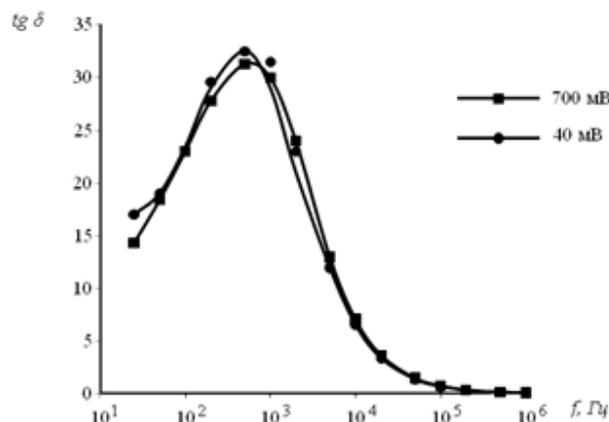


Рисунок 1 – Зависимость $\text{tg } \delta$ от частоты для воды при различных уровнях измерительного сигнала

По нашему мнению, значительное увеличение численных значений $\text{tg } \delta$ обусловлено увеличением вязкости воды в приэлектродном пространстве (ДЭС), уменьшением диэлектрической проницаемости воды в этом же электрическом слое (тем самым уменьшение реактивной энергии в датчике), увеличением сопротивления водной прослойки в ДЭС. Мы понимаем, что сделанное предположение требует проведения дополнительных и прецизионных измерений, ведь речь идет о свойствах слоев воды толщиной в десятые, сотые, тысячные доли миллиметра. Именно с размерами такого порядка сталкиваются разработчики микро- и нанoeлектронных изделий.

Таким образом, представленные выше результаты и сравнение их с результатами, опубликованными, например, в [2], однозначно свидетельствуют о том, что ДЭС существенно изменяет энергию активации релаксационного процесса. Частоте 500 Гц на рисунке 1 соответствует энергия активации 0,54 эВ. Это значение энергии заметно больше, чем аналогичная энергия активации для неструктурированной электрическим полем ДЭС воды (0,46 эВ).

Список литературы

1. Цивадзе, А. Ю. Структурная самоорганизация в растворах и на границе раздела фаз : моногр. / А. Ю. Цивадзе // ЛКИ. – М., 2008. – 544 с.
2. Method for determining of bond energy in nanostructured water / S. A. Volchek [et al.] // International Journal of Nanoscience. – 2019. – Vol. 1, № 1. – P. 1–4.

The result of the influence of the electric field of the metal-water interface DES on the electrophysical properties of deionized water is presented. The activation energy of the relaxation process associated with the properties of water located in the Gui-Helmholtz layer is determined.

Скавыш Юлия Олеговна, студентка 3 курса факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, julia.skavysh@gmail.com.

Лецинская Ангелина Викторовна, студентка 3 курса факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, angelina260194@gmail.com.

Григорьев Александр Сергеевич, аспирант 2 года обучения Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, flory93@bk.ru.

Научный руководитель – *Петрович Владимир Алексеевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, svetvolch@gmail.com.

УДК 538.9

Ю. О. СКАВЫШ, А. В. ЛЕЦИНСКАЯ

РЕЛАКСАЦИОННЫЙ ПРОЦЕСС В ДЕИОНИЗОВАННОЙ ВОДЕ

Представлены результаты исследования релаксационного процесса в деионизованной воде. Зарегистрировано максимальное значение тангенса угла диэлектрических потерь на определенной частоте и проведено сравнение с другими ранее полученными результатами в этой области.

При производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем широко используются различные технологические операции, связанные с использованием деионизованной воды, а также растворов на ее основе. В связи с этим, а также в связи с разработкой новых технологических операций в области микро- и нанoeлектроники, становится весьма актуальной задача не только получения сверхчистой воды и изучения ее свойств, но и их изменение при внесении в воду различных примесей.

Применительно к любой среде (твердое тело, жидкость, газ) $\text{tg}\delta$ – это отношение двух энергий: в числителе – активная энергия (мощность), в знаменателе – реактивная энергия (мощность). В работе [1] было показано, что этот параметр является наиболее чувствительным к структуре и свойствам различных сред. Более того, численные значения $\text{tg}\delta$ не зависят от геометрических размеров и конструкции датчика, находящегося, например, в деионизованной воде.

В публикации [2] было показано, что для гомологического ряда *N*-спиртов в диапазоне частот не выше 1 МГц зависимость $\text{tg}\delta$ имеет максимум. Авторы этой работы справедливо отмечают, что в этом же районе частот значение диэлектрической проницаемости спиртов уменьшается.

С нашей точки зрения, структурная формула молекул воды может быть записана так же, как и для любого из спиртов (R-OH для спиртов и H-OH для воды).

По этой причине мы ожидали и обнаружили, что деионизованная вода так же, как и спирты, в упомянутом диапазоне частот обладает ярко выраженной экстремальной зависимостью $\text{tg}\delta$ от частоты (*f*) (рисунок 1а).

Для регистрации $\text{tg}\delta$ был использован регистратор иммитанса Е7-25 (производство ОАО «МНИПИ» г. Минска). В качестве датчика мы использовали два металлических электрода, изолированных от непосредственного контакта с водой слоем высококачественного диэлектрика. Частным случаем таких датчиков могут быть медные спирали или штыри, изготовленные на основе провода марки ПЭВ-2. Металлические части датчикам изолированы от прямого контакта с водой слоем эмали – винифлекс (или поливинилацеталь). Лак был нанесен заводом-изготовителем моточных проводов. По этой причине использованные нами датчики давали возможность наблюдать только за объемными свойствами воды. Свойства же слоев воды, находящихся в слое Гуи – Гельмгольца (некий аналог областей ОПЗ в *p-n*-переходах) таким датчиком не контролируются.

Значение $\text{tg}\delta$ (в соответствии с рисунком 1а) в максимуме равно 0,4 единицы при частоте около 20 кГц. На частотах, ниже 100 Гц, значение $\text{tg}\delta$ порядка 0,02 и может быть принято за 0 по отношению к его максимальному значению. При частотах свыше 1 МГц ситуация аналогична: значение $\text{tg}\delta$ стремится к 0.

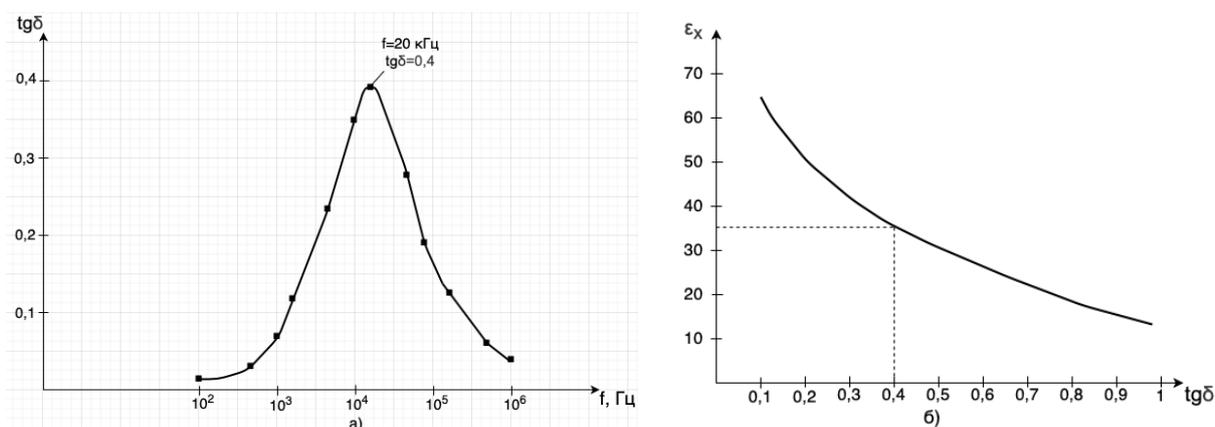


Рисунок 1 – Зависимость $\text{tg}\delta$ от частоты:
 а) экспериментальная зависимость $\text{tg}\delta$ от частоты, б) теоретическая зависимость ϵ_x от $\text{tg}\delta$

В соответствии с моделью релаксационных потерь (моделью Дебая) такое поведение $\text{tg}\delta$ описывается уравнением (1):

$$\text{tg}\delta = \frac{\omega\tau(\epsilon_c - \epsilon_x)}{\epsilon_r + \epsilon_x(\omega\tau)^2} \quad (1)$$

Максимальное значение $\text{tg}\delta$ определяется условием (2):

$$\omega\tau = \sqrt{\frac{\epsilon_c}{\epsilon_x}} \quad (2)$$

В этих уравнениях $\omega = 2\pi f$, где f – частота измерений в Гц, τ – время релаксации наблюдаемого процесса, ϵ_c – стационарное значение диэлектрической проницаемости (для воды находится в районе 80 ± 2 единиц), ϵ_x – диэлектрическая проницаемость при частоте намного большей, чем частота, отвечающая максимальному значению $\text{tg}\delta$.

Решая систему уравнений (1) и (2), мы получили соотношение (3):

$$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_x} = (1 + 2\text{tg}^2\delta) - 2\text{tg}\delta \sqrt{1 + \text{tg}^2\delta}. \quad (3)$$

Графический вид этого соотношения представлен на рисунке 1б. Эта зависимость позволяет оперативно, по значениям $\text{tg}\delta$ в максимуме определить значение диэлектрической проницаемости ϵ_x , до которой уменьшается ϵ_c на «высоких» частотах.

Совместный анализ рисунка 1а и б позволяет сделать следующее заключение: на частотах в районе 20 кГц и выше диэлектрическая проницаемость деионизованной воды уменьшается до значения 35 единиц.

Этот результат имеет существенную новизну: до сих пор считалось, что до частот порядка 10^9 Гц значение диэлектрической проницаемости воды не меняется и составляет порядка 80 единиц.

Вполне понятно, что единичным структурным элементом воды является диполь H_2O . Находясь в относительно свободном состоянии (в жидкой фазе) вода неизбежно подвержена структурной самоорганизации [3; 4]. При этом в воде формируются нанокластеры различной структуры. Проявление одной из форм этих кластеров мы и наблюдаем на дисперсии $\text{tg}\delta(f)$. Выяснением, какова при этом структура конкретного нанокластера, мы сейчас занимаемся.

Можно отметить только следующее: численное значение частоты, на которой наблюдается максимальное значение $\text{tg}\delta$, позволяет определить энергию активации соответствующего релаксационного процесса по методике, предложенной в работе [5]. Для нашего случая частоте 20 кГц, соответствующей максимуму $\text{tg}\delta$, соответствует энергия активации $E_a = 0,46$ эВ. Это весьма значительная энергия связи, хотя в целом она соответствует (по порядку величины) известному значению энергии водородных связей.

Основные результаты представленной работы:

- особые свойства деионизованной воды (поведение тангенса угла в килогерцовой области частот) могут быть использованы как диагностический инструмент при разработке и контроле технологических процессов не только в микро- и нанoeлектронике, но и в биомедицине;
- релаксационный процесс для деионизованной воды в килогерцовой области свидетельствует, с точки зрения физики протекающих в воде процессов ее самоорганизации, о структурной неоднородности воды;
- на основе полученных значений $\text{tg}\delta$ и соответствующих этим значениям частот можно отслеживать энергию активации релаксационного процесса и величину диэлектрической проницаемости воды.

Список литературы

1. Method for determining of bond energy in nanostructured water / S. A. Volchek [et al.] // International Journal of Nanoscience. – 2019. – Vol. 1, № 1. – P. 1–4.
2. Займак, А. М. Килогерцовые диэлектрические спектры гомологического ряда Н-спиртов / А. М. Займак, А. Н. Гетало // Физика конденсированного состояния : материалы XIII междунар. научн.-практ. конф., Гродно, 16 апр. 2015 г. – Гродно : ГрГУ, 2015. – 224 с. – С. 29–31.
3. Цивадзе, А. Ю. Структурная самоорганизация в растворах и на границе раздела фаз : моногр. / А. Ю. Цивадзе // ЛКИ. – М., 2008. – 544 с.
4. Клеман, М. Основы физики частично упорядоченных сред: жидкие кристаллы, коллоиды, фрактальные структуры, полимеры и биологические объекты / М. Клеман, О. Д. Лаврентович ; пер. с англ. под ред. С. А. Пикина, В. Е. Дмитриенко. – М. : Физматлит, 2007. – 680 с.
5. Метод контроля свойств технологических жидкостей / С. А. Волчѣк [и др.] // Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век. – 2019. – № 3. – С. 5–13.

The results of relaxation processes and the value corresponding to the activation energy for deionized water in the frequency range from 100 Hz to 1 MHz are presented.

Скавыши Юлия Олеговна, студентка 3 курса факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, julia.skavysh@gmail.com.

Лецинская Ангелина Викторовна, студентка 3 курса факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, angelina260194@gmail.com.

Научный руководитель – *Петрович Владимир Алексеевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, svetvolch@gmail.com.

П. А. СМОЛИЧ, С. Н. АНУЧИН

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА КОМПЛЕКСА ВКЛЮЧЕНИЯ КРЕЗИЛ ФИОЛЕТА С β -ЦИКЛОДЕКСТРИНОМ

Одной из важных проблем, ограничивающих сферу практических применений лазеров на красителях, является фотораспад их молекул и, как следствие, недостаточный ресурс работы активных сред. Особенно это актуально для лазеров на красителях с ламповой накачкой, где в излучении накачки присутствует достаточно жесткое УФ-излучение. Под воздействием излучения накачки органические молекулы участвуют в фотохимических реакциях, в результате которых образуются обратимые и необратимые фотопродукты, вносящие потери в области усиления активной среды.

Реализация возможностей практического применения лазеров на красителях связана с дальнейшим улучшением их параметров, определяемых характеристиками растворов красителей. Вода, является предпочтительным растворителем, обладая при возбуждении наименьшими термооптическими искажениями, что отражается на пространственно-угловых характеристиках генерации. Однако в чистых водных растворах происходит димеризация и агрегация молекул красителей, что резко снижает КПД генерации. Для устранения эффекта агрегации и димеризации необходимо защитить молекулы красителя от воды, снизить потери на триплет-триплетное поглощение и ингибировать фотохимические реакции при УФ возбуждении. Перспективными добавками для этого являются циклодекстрины, молекулы которых имеют тороидальную форму и полость, в которую могут внедряться молекулы красителя [1]. При правильном подборе геометрических размеров молекул красителя и полости циклодекстрина можно сформировать в растворе комплексы включения типа «гость – хозяин», позволяющие полностью защитить лазерный краситель от нежелательного воздействия растворителя, молекулярного кислорода и УФ-излучения накачки. Молекулы циклодекстрина могут взаимодействовать с молекулами красителя как во внутренней гидрофобной полости, образуя комплексы включения, так и по внешней гидрофильной сфере образуя ассоциативные комплексы за счет межмолекулярных водородных связей.

Циклодекстрины, формируя комплексы включения с органическими молекулами, могут менять их фундаментальные оптические свойства. В этой связи, создание высокоэффективных активных сред перестраиваемых лазеров на основе комплексов включения с циклодекстринами представляет большой научный и практический интерес.

Объектом исследования является комплекс включения крезил фиолета (оксазин 17) с β -циклодекстрином. Синтез комплекса включения красителя с β -CD осуществлялся в соответствии с методом сорастирания, описанным в [1].

На рисунке 1 представлены спектры поглощения крезил фиолета в этаноле и комплекса включения с β -циклодекстрином в водно-этанольном растворе [2–5].

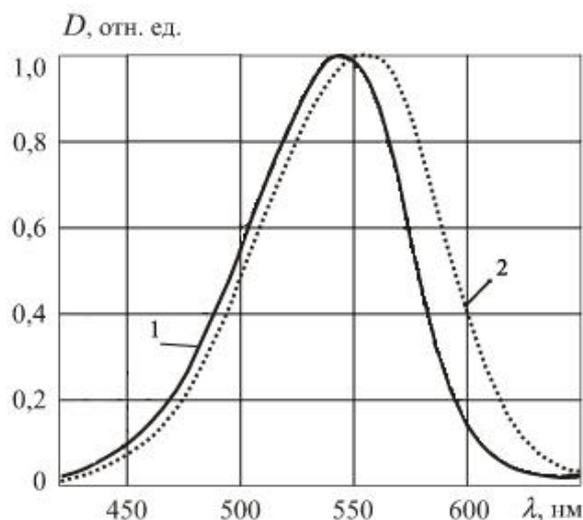


Рисунок 1 – Спектр поглощения крезил фиолета в этаноле (1) и комплекса включения с β -циклодекстрином (2)

Как видно из рисунка 1, при образовании комплекса включения наблюдается батохромное смещение спектра поглощения (на 5 нм) по сравнению с исходным красителем.

Для выяснения структуры комплекса включения были проанализированы спектры ИК поглощения крезил фиолета, его комплекса включения и β -циклодекстрина, представленные на рисунке 2.

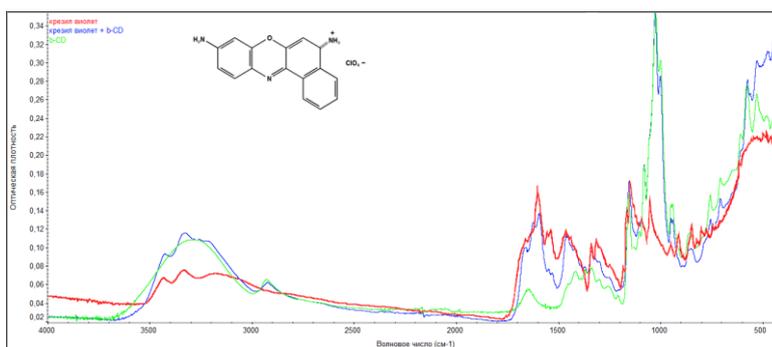


Рисунок 2 – ИК-спектры поглощения крезил фиолета (кр.), его комплекса включения (син.) и β -циклодекстрина (зел.)

Полосы, соответствующие крезил фиолету в спектре комплекса включения, испытывают слабое (до 5 см^{-1}) bathochromic смещение относительно своего исходного положения. Аналогично, как и для фенолемиа 160, в спектре ИК комплекса включения крезил фиолета с β -CD появляются несколько новых полос, характерных для β -CD (при 1000 см^{-1} и 2900 см^{-1}). При этом наблюдается незначительное падение интенсивности полос в области $1600\text{--}800\text{ см}^{-1}$, соответствующей различным колебаниям ядра молекулы красителя. Широкая структурированная полоса в низкочастотной области спектра $600\text{--}400\text{ см}^{-1}$, обусловлена колебаниями перхлорат-иона и части молекулы красителя, соответствующей β -нафталину. Формирование комплекса включения приводит к увеличению интенсивности данной полосы и её структурированию (как и у β -CD), что может быть связано с колебаниями наружной оболочки циклодекстрина. Характерная для циклодекстрина полоса колебаний в области $3500\text{--}3000\text{ см}^{-1}$, при образовании комплекса включения усиливается двумя максимумами, которые соответствуют валентным колебаниям аукохромных групп крезил фиолета ($-\text{NH}_2$, $=\text{NH}$). Возрастание их интенсивности и сохранение формы полос, аналогичной спектру крезил фиолета, свидетельствует, что данные функциональные группы находятся снаружи комплекса включения и возбуждаются по цепи сопряжения молекулы. Об этом, свидетельствует также возрастание и гипсохромное смещение (-10 см^{-1}) максимума полосы в области 1580 см^{-1} , соответствующей колебаниям ароматических колец ядра крезил фиолета (таблица 1).

Таблица 1 – Отнесение колебаний полос ИК спектра крезил фиолета

Волновое число ν , см^{-1}	Отнесения колебаний
3410	Валентные колебания O-H
3320	Валентные колебания N-H
3170	Валентные колебания N-H
2830	Валентные колебания C-H
2330	Валентные колебания $\text{C}\equiv\text{N}$
2150	Колебания $\text{C}\equiv\text{N}$
1970	Асимметричные валентные колебания $-\text{C}=\text{C}=\text{C}-$
1630	Валентные колебания $\text{C}=\text{O}$
1580	Колебания ароматического кольца
1520	Симметричные валентные колебания N-H (ядро)
1452	Ножничные колебания C-H (ядро)
1323	Колебания кольца (ядро)
1311	Колебания кольца (ядро)
1170	Асимметричные колебания кольца (ядро)
1165	Асимметричные колебания кольца (ядро)
1050	Валентные колебания C-OH
999	Колебания кольца производных бензола
882	Валентные колебания $-\text{C}-\text{N}-$
833	Валентные колебания $-\text{C}-\text{C}-$
767	Колебания производных β -нафталина
703	Колебания кольца циклооктана

В ИК спектре комплекса крезил фиолет + β -CD присутствуют также полосы (3410, 3320, 1580, 1450, 1320, 1170 cm^{-1}), характерные для ИК-спектра красителя, соответствующие колебаниям концевых аминогрупп и различным типам колебаний ядра молекулы. Наблюдаются также нехарактерные валентные колебания группы $\text{C}\equiv\text{N}$ (2330 и 2150 cm^{-1}), свидетельствующие об образовании водородных связей между красителем и внешней поверхностью других молекул циклодекстрина.

Поскольку, затухающих колебаний каких-либо частей молекулы крезил фиолета не наблюдается, но есть усиление интенсивности ряда колебательных полос, соответствующих цепи сопряжения ($\sim 1000\text{--}700 \text{ cm}^{-1}$) – то можно предположить, что межмолекулярное взаимодействие осуществляется за счёт вхождения фенильной группы красителя в полость циклодекстрина. При этом, основная цепь сопряжения – флуороновое ядро молекулы – находится снаружи и влияние циклодекстрина на такой комплекс включения минимально, а сам он является неустойчивым. Это подтверждается также более низкими генерационными параметрами комплекса включения в сравнении с чистым красителем. Вероятный внешний вид модели комплекса включения крезил фиолета с циклодекстрином представлен на рисунке 3.

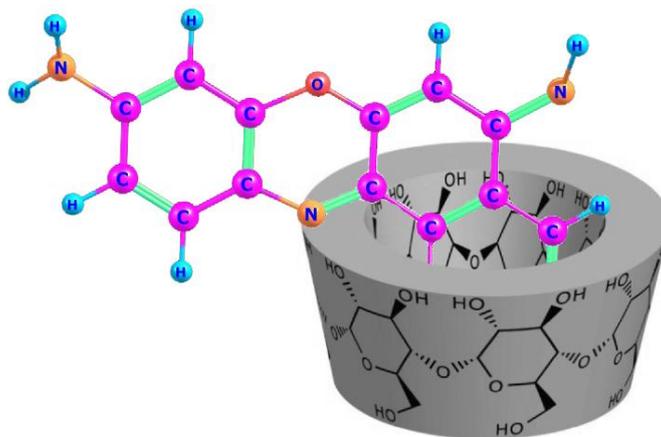


Рисунок 3 – 3D-модель комплекса включения крезил фиолета с β -CD

Список литературы

1. Методы получения наноконплексов биологически активных веществ с циклическими олигосахаридами, анализ их физико-химических свойств и использование в пищевом производстве / М.А. Капустин [и др.] // Труды БГУ. – 2016. – Т. 11, ч. 1. – Минск : Изд-во БГУ, 2016. – С. 73–100.
2. Лазеры на красителях / под ред. Ф. П. Шефера ; пер. с англ. – М. : Мир, 1976. – 360 с.
3. Brackmann, Ulrich. Lambdachrome. Laser Dyes / Ulrich Brackmann // Lambda Physik AG D-37079. – 3rd ed. – Goettingen, Germany, 2000. – 294 p.
4. Sabadini, E. Solubility of cyclomaltooligosaccharides (cyclodextrins) in H₂O and D₂O: a comparative study / E. Sabadini, T. Cosgrove, F. D. C. Egidio // Carbohydrate Research. – 2006. – Vol. 341, № 2. – P. 270–274.
5. Николаев, С. В. Исследование новых твердотельных активных сред на основе промышленных полиуретановых компаундов, активированных красителями / С. В. Николаев, В. В. Пожар, М. И. Дзюбенко // Радиофизика и электроника. – 2012. – Т. 3 (17), № 2. – С. 80–86.

One of the important problems limiting the scope of practical applications of dye lasers is the photodisintegration of their molecules and, as a result, the insufficient life of active media. This is especially true for lamp-dye dye lasers, where fairly hard UV radiation is present in the pump radiation. Under the influence of pump radiation, organic molecules participate in photochemical reactions, resulting in the formation of reversible and irreversible photo products, introducing losses in the amplification region of the active medium.

Смолич Павел Александрович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, smolich_PA_15@student.grsu.by.

Анучин Сергей Николаевич, заведующий лабораториями кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, anuchin_sn@grsu.by.

Научный руководитель – *Ануфрик Славмир Степанович*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, anufrick@grsu.by.

А. С. СОРОКА

ЭКСТРАОРДИНАРНЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА В ТОНКИХ МАГНИТОУПОРЯДОЧЕННЫХ ПЛЁНКАХ ПЕРМАЛЛОЯ

Изучены петли гистерезиса эффекта Холла в тонких ($d = 80\text{--}280$ нм) магнитоупорядоченных пленках пермаллоя при разных углах ($\varphi = 0^\circ\text{--}180^\circ$) между плоскостью пленки и направления магнитного поля с индукцией до $B = \pm 1$ Тл. Пленки пермаллоя получены на ситалловой подложке методом ионно-лучевого распыления. В экстраординарном эффекте Холла обнаружены резкие пики, обусловленные изменением поперечной и продольной составляющей тензора удельного сопротивления магнитоупорядоченной среды при ее перемагничивании. Установлено, что при изменении угла между плоскостью пленки и направлением магнитного поля от 0° до 90° положение пика ЭДС Холла изменяется от 0,2 до 5 мТл.

В настоящее время большое внимание уделяется установлению влияния типа доменных стенок на гальваномагнитные коэффициенты в магнитоупорядоченных средах, так как они существенно влияют не только на величину, но и в процессе перестройки могут определять их знак и зависимость от магнитного поля. Надо отметить, что в различных средах с магнитным упорядочением наблюдались противоположные по знаку изменения гальваномагнитных коэффициентов [1–3] из-за наличия доменных стенок. Так, в [4] обнаружено изменение знака магнитосопротивления диска Корбино при перемагничивании пленок пермаллоя. Целью данной работы явилось изучение особенностей гистерезиса эффекта Холла в случае перемагничивания пленок пермаллоя при предельном переходе от измерения классического эффекта Холла к планарному.

Пленки пермаллоя ($\text{Ni}_{0,8}\text{Fe}_{0,2}$) были получены методом ионно-лучевого распыления мишени на ситалловую диэлектрическую подложку во внешнем магнитном поле с индукцией $B = 0,01$ Тл. Толщина пленок варьировались в пределах $d = 80\text{--}280$ нм. Образцы в виде прямоугольного параллелепипеда или квадрата с размерами от 2×5 до 5×5 мм изготавливались методом фотолитографии и травления. Точечные омические контакты формировались нанесением на поверхность пленки легкоплавкого припоя, к которому припаивались медные проволочки. Эффект Холла измерялся в режиме генератора тока при $T = 300$ К в поле электромагнита с индукцией $B = 1$ Тл и катушки Гельмгольца с индукцией до 10 мТл при сканировании поля в двух направлениях. Измерения проводились при разных углах (φ) между направлением магнитного поля и плоскостью образца, т. е. при переходе от измерения классического эффекта Холла ($\varphi = 90^\circ$) до планарного ($\varphi = 0^\circ$) в интервале углов $\varphi = 0^\circ\text{--}180^\circ$.

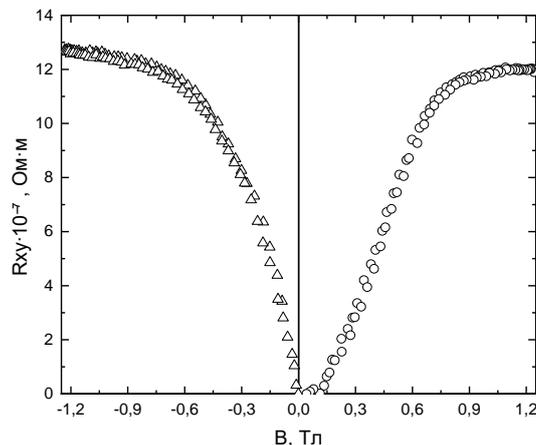


Рисунок 1 – Зависимость холловского сопротивления плёнки пермаллоя от индукции магнитного поля

На рис. 1 показаны магнитопольевые зависимости классического холловского сопротивления $R_{yx} = U_y/I_x$. Видно, что в отличие от эффекта Холла в диамагнетиках, показывающих линейную зависимость R_{yx} от индукции магнитного поля, в случае наличия магнитного упорядочения в магнитном поле $B > 0,6$ Тл наблюдается тенденция к насыщению холловского сопротивления, обусловленная наличием спонтанной намагниченности. Согласно [5] оно может быть описано соотношением:

$$R_{yx} = R_0 H_{int} + R_1 M,$$

где R_0 – обычный коэффициент Холла, H_{int} – напряженность внешнего магнитного поля, R_1 – экстраординарный коэффициент Холла, M – намагниченность.

Это позволяет по наклону экспериментальной зависимости определить величину обычного и экстраординарного коэффициентов Холла. Так величина холловского сопротивления, определяемая обычным эффектом Холла составила $0,8 \cdot 10^{-7}$ Ом·м, а определяемая экстраординарным – $11,8 \cdot 10^{-7}$ Ом·м. Несимметрия магнитополевой зависимости R_{yx} при измерении в разных направлениях магнитного поля может быть связана с остаточной намагниченностью полюсов электромагнита.

Уменьшение холловского сопротивления при увеличении φ в первую очередь обусловлено уменьшением нормальной к плоскости пленки составляющей магнитного поля. В случае измерения планарного эффекта Холла ($\varphi = 0$) измеряемые величины холловского напряжения были на уровне шумов измерительной установки.

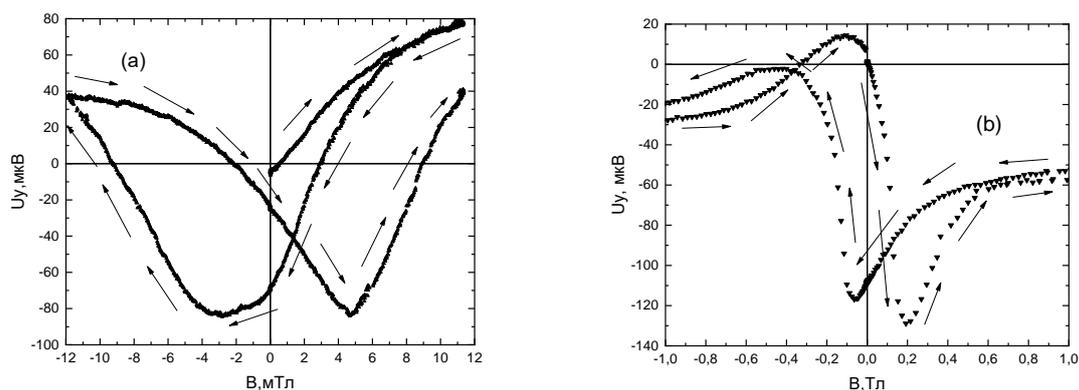


Рисунок 2 – Гистерезис холловского напряжения при $\varphi = 90^\circ$ (а) и $\varphi = 45^\circ$ (б) в области слабых магнитных полей

На рис. 2 показаны магнитополевые зависимости холловского сопротивления в слабом поле катушки Гельмгольца, которая не содержит сердечника. Направление изменения поля показано стрелками. Можно видеть, что перемагничивание образца приводит к наблюдению в слабом поле достаточно резких пиков холловского сопротивления, положение которых зависит от угла между направлением магнитного поля и плоскостью образца. Причем изменение φ от 90° до 0° приводит к уменьшению магнитного поля положения пика холловского сопротивления. Угловая зависимость пика R_{yx} при увеличении поля в направлении B^+ и B^- показана на рис. 3. Видна асимметрия зависимости положения пика в интервале углов $0-90$ и $90-180$. Отметим, что в [4] наблюдалась аналогичное поведение пика магниторезистивного эффекта в таких пленках, которое было связано с разным углом между намагниченностью образца и направлением поля B^+ и B^- .

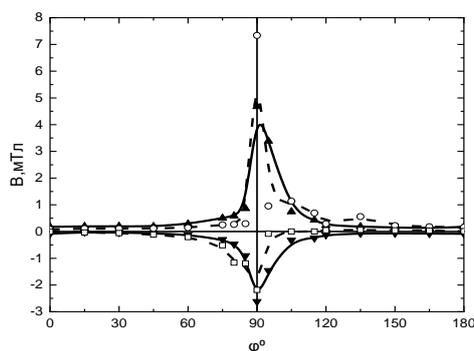


Рисунок 3 – Зависимость положения пика холловского сопротивления и магнитосопротивления (пунктирная линия) от угла φ

Обычный, характерный для диамагнетиков, коэффициент Холла зависит от механизма рассеяния через холл-фактор, который в металлах равен единице [6]. Следовательно, пики холловского сопротивления в экстраординарном эффекте Холла обусловлены также изменением сопротивления пленки при ее

перемагничивании. Это подтверждает хорошая корреляция угловых зависимостей пиков эффекта Холла (сплошная линия) и магниторезистивного эффекта (пунктирная линия). Так как в исследуемых пленках направление намагничивности лежит в плоскости пленки или близко к ней, то сдвиг положения максимума холловского сопротивления при увеличении угла обусловлен более трудной перестройкой доменной структуры при намагничивании пленки в направлении, перпендикулярном ее плоскости, из-за огромного размагничивающего фактора в этом направлении из-за малой толщины.

Таким образом, пленки пермаллоя, полученные методом ионно-лучевого распыления мишени на диэлектрическую подложку, показывают характерную для ферромагнетиков магнитолеву зависимость холловского сопротивления, с величинами удельного сопротивления $0,8 \cdot 10^{-7}$ Ом·м и $11,8 \cdot 10^{-7}$ Ом·м определяемыми обычным и экстраординарным эффектом Холла, соответственно. Обнаруженные пики холловского сопротивления обусловлены изменением сопротивления пленки вследствие рассеяния электронов доменными стенками при перемагничивании пленок. При изменении угла между плоскостью пленки и направлением магнитного поля от 0° до 90° положение пика холловского сопротивления изменяется в интервале от 0,2 до 5 мТл.

Список литературы

1. Negative domain wall contribution to the resistivity of microfabricated Fe wires / U. Ruediger [et al.] // Physical Review Letters. – 1998. – Vol. 80. – P. 5639–5642.
2. Domain-wall scattering in epitaxial FePd ordered alloy films with perpendicular magnetic anisotropy / D. Ravelosona [et. al] // Physical Review. – 1999. – Vol. 59. – P. 4322–4326.
3. Sofin, R. J. Positive antiphase boundary domain wall magnetoresistance in Fe_3O_4 (110) heteroepitaxial films / R. J. Sofin, S. K. Arora, I. V. Shvets // Physical Review. – 2011. – Vol. 83, № 13. – P. 134436–134436-9.
4. Головчук, В. И. Магнитная микроструктура и магниторезистивный эффект в диске Корбино с магнитным упорядочением / В. И. Головчук, М. Г. Лукашевич // Журн. Бел. гос. ун-та. Сер., Физика. – 2018. – Т. 3, № 46. – P. 53.
5. Campbel, I. A. Transport Properties of Ferromagnets in Ferromagnetic Materials / I. A. Campbel, A. Fert. – Amsterdam, New York, Oxford. – 1982. – P. 747–805.
6. Киреев, П. С. Физика полупроводников : учеб. пособие для вузов / П. С. Киреев. – М. : Высш. шк., 1975.

The hysteresis loops of the Hall effect have been investigated in thin ($d = 80\text{--}280$ nm) magnetically ordered permalloy films at different angles ($\varphi = 0^\circ\text{--}180^\circ$) between the plane of the film and the direction of the magnetic field with induction up to $B = \pm 1$ T. The films were prepared by ion-beam sputtering on a ceramic substrate. It has been obtained that when the angle between the film plane and the direction of the magnetic field changes from 0° to 90° , the Hall effect peak position ranging in the range of 0,2–5 mT.

Сорока Александра Сергеевна, студентка 3 курса физического факультета (кафедра физики полупроводников и наноэлектроники) Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, alex.soroka2000@gmail.com.

Научный руководитель – *Лукашевич Михаил Григорьевич*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, Lukashevich@bsu.by.

УДК 538.911,539.26

Н. А. СТЕПАНЮК

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕМЕНТНОГО, ФАЗОВОГО СОСТАВОВ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ HfNbTaTiZr И HfNbTaTiZrC_5

Работа посвящена сравнительному исследованию элементного и фазового состава, механических свойств образцов многокомпонентных систем HfNbTaTiZr и HfNbTaTiZrC_5 . В дальнейшем будут проведены исследования указанных материалов на радиационную и коррозионную стойкость.

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) – перспективный класс материалов, рассматриваемый на роль кандидата для конструкционного применения в различных областях. Согласно определению, высокоэнтропийными являются сплавы, состоящие из 5 и более элементов, атомное содержание каждого из которых лежит в пределах от 5 % до 35 %. Как правило, ВЭС образуют кристаллическую решетку единой фазы твердого раствора, типа ОЦК или ГЦК, в зависимости от величины разброса электроотрицательностей входящих элементов. Высокоэнтропийные сплавы имеют различные физические свойства, которые определяются в первую очередь свойствами входящих в их состав элементов и стехиометрией [1].

Также появилась идея создания высокоэнтропийной керамики (ВЭК), представляющей собой карбиды, нитриды, бориды и т. п. высокоэнтропийных сплавов. Аналогично ВЭС, ВЭК обладают различными свойствами в зависимости от стехиометрии, однако у карбидной ВЭК отмечаются, как и у монокарбидов переходных металлов, повышенные твердость, прочность на разрыв и тугоплавкость [2].

Материалы были получены методом высокоэнергетической механической обработки и последующим искровым плазменным спеканием при температуре 2000 °С. Были проведены рентгеноспектральный микроанализ образцов, рентгеноструктурный анализ на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV и измерена методом Виккерса микротвердость материалов на установке Wilson Instruments MWD 402.

Данные рентгеноспектрального анализа показали следующие атомные содержания элементов для системы HfNbTaTiZr: 18,26 % Hf, 21,84 % Nb, 21,61 % Ta, 9,49 % Ti, 17,27 % Zr, примесные 10,39 % Fe и 1,14 % Cr.

Аналогичное исследование показало следующие атомные содержания металлов для системы HfNbTaTiZrC₅: 19,26 % Hf, 23,24 % Nb, 18,22 % Ta, 18,53 % Ti, 14,62 % Zr, примесные 2,19 % Fe, 3,93 % Mo.

Можно заметить, что в системе больше всего присутствуют ОЦК-металлы тантал и ниобий, а также, кристаллическая решетка основной фазы имеет вид, близкий к кристаллической решетке Ta и Nb. Наиболее вероятно, что основной является ОЦК-фаза твердого раствора Nb-Ta-Ti, так как ОЦК-модификации этих металлов имеют наиболее подходящее расположение дифракционных рефлексов. О наличии в составе основной фазы элементов Zr и Hf утверждать что-либо сложно, поскольку решетка ВЭС не имеет строгой зависимости от решеток изоморфных модификаций входящих элементов в силу высокого энтропийного конфигурационного фактора, при этом система имеет еще минимум 4 фазы из свободных металлов Hf, Zr и оксидов HfO₂ и Ta₂O₅.

У карбидной HfNbTaTiZrC₅ также преобладают монокарбиды Nb, Hf и Ta, однако в ней большее содержание Ti, чем в HfNbTaTiZr. Можно предполагать наличие ВЭК (Hf, Nb, Ta, Ti, Zr) C с ГЦК-решеткой в качестве основной фазы для данной системы. Цирконий представлен также фазой ZrO₂, но, согласно сравнению интегральных интенсивностей ее рефлексов с рефлексами основной фазы, ее содержание невелико.

Микротвердости систем HfNbTaTiZr и HfNbTaTiZrC₅ равны соответственно 11,29 ГПа и 18,32 ГПа, превосходство микротвердости карбидной керамики над микротвердостью металлической системы на 62 % объяснимо и ожидаемо, поскольку является одной из отличительных черт керамики в целом.

Таким образом, метод высокоэнергетической плазменной обработки с последующим искровым плазменным спеканием пригоден для создания ВЭС и ВЭК из элементов или соединений со схожим типом кристаллической решетки, однако малоприспособен для создания ВЭС из элементов с различными решетками, особенно при больших содержаниях ГПУ-металлов. Для применения в промышленности или энергетике из указанных систем по свойствам и составу наиболее подходит именно карбидная ВЭК. В дальнейшем будут изучены радиационные и коррозионные свойства указанных систем с целью дать более полное заключение об их применимости в атомной энергетике.

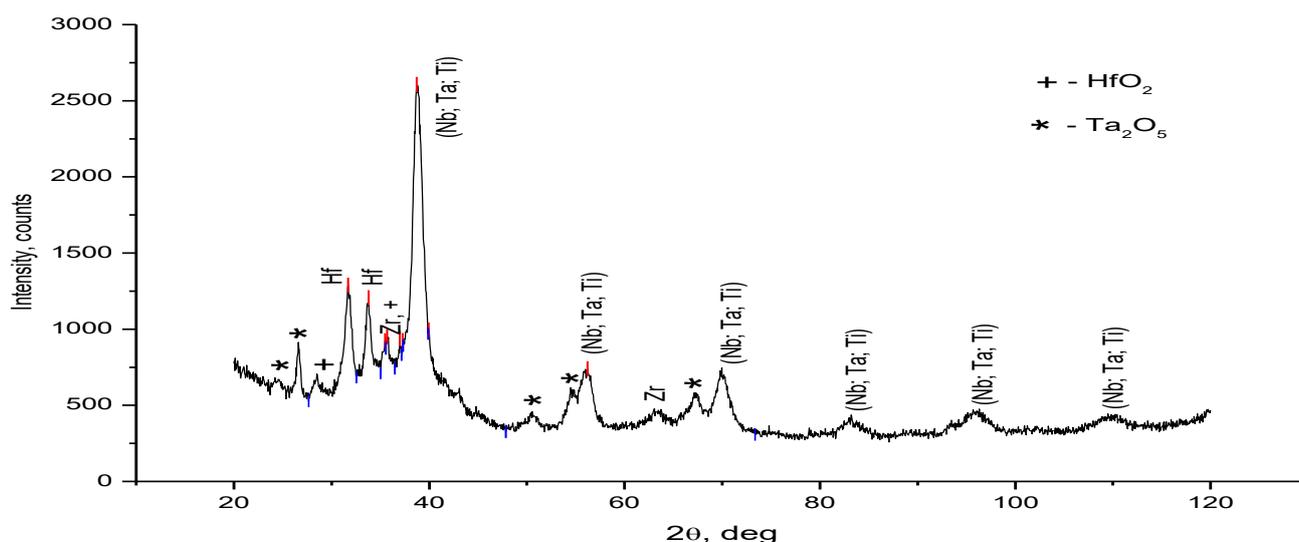


Рисунок 2 – Рентгеновская дифрактограмма образца системы HfNbTaTiZr

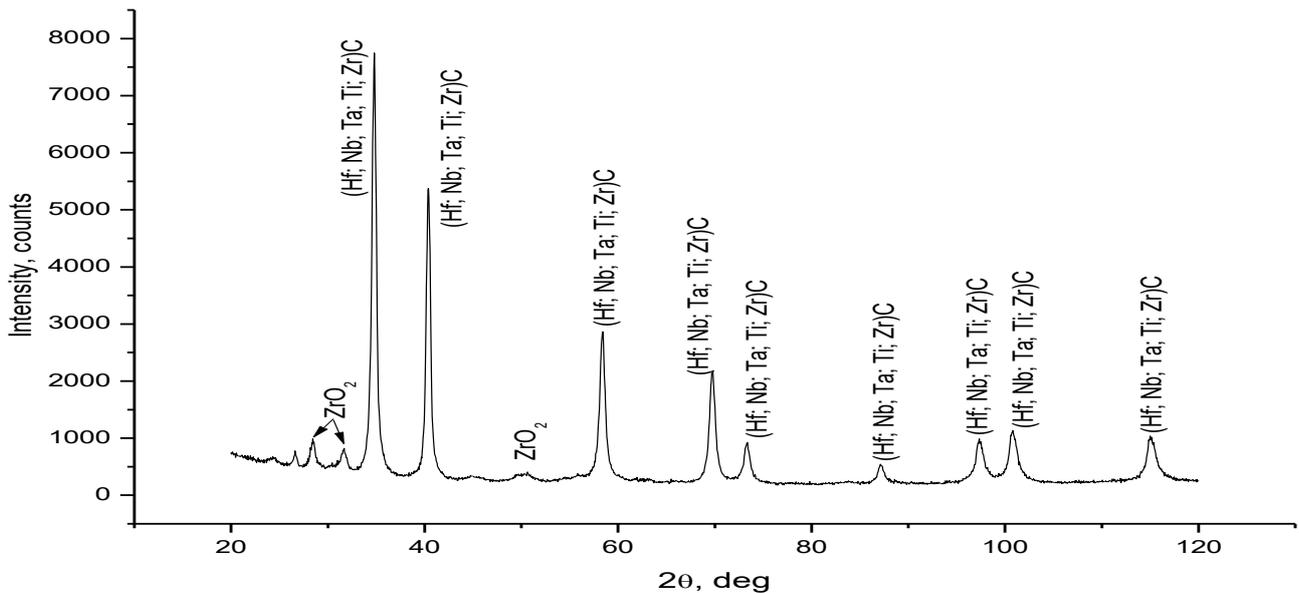


Рисунок 3 – Рентгеновская дифрактограмма образца системы HfNbTaTiZrC_5

Список литературы

1. Entropy Alloy: Challenges and Prospects / Y. F. Ye [et al.] // Progress in Materials Science, Materials Today. – December 2015. – P. 1–14.
2. Synthesis and characterization of multicomponent $(\text{CrNbTaTiW})\text{C}$ films for increased hardness and corrosion resistance / Paulius Malinovskis [et al.] // Materials & Design, doi:10.1016/j.matdes.2018.03.068.

This paper is devoted to the comparison of element, phase composition and mechanical properties of multicomponent systems HfNbTaTiZr and HfNbTaTiZrC_5 . In perspective, these materials will be analyzed on their corrosion and irradiation resistance.

Степанюк Никита Александрович, студент физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, nik.stepanjuk.99@mail.ru.

Научный руководитель – *Углов Владимир Васильевич*, доктор физико-математических наук, профессор, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, Uglov@bsu.by.

УДК 539.213.26 539.213.27

Я. Н. СУГАК

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЦИРКОНИЯ, ОБЛУЧЁННЫХ ИОНАМИ ГЕЛИЯ

Рассматриваются изменения в фазовом составе и микроструктуре поверхности аморфных металлических сплавов на основе циркония после облучения ионами He энергией 40 кэВ и пострadiационного термического вакуумного отжига.

Благодаря наличию только ближнего порядка, аморфные металлические сплавы (АМС) обладают уникальными механическими, магнитными свойствами, высокой коррозионной стойкостью. Отсутствие кристаллической структуры должно также особым образом отражаться и на радиационной стойкости аморфных сплавов. Так, в работах [1] было показано, что аморфные сплавы сохраняют структуру поверхности вплоть до доз $1 \cdot 10^{18}$ ион/см². Известно, что повышение температуры кристаллических образцов (например, при отжиге) облученных тяжелыми ионами образцов способствует появлению вздутий, трещин и других радиационно-стимулированных эффектов уже при дозах $1 \cdot 10^{17}$ ион/см² [2]. Радиационно-стойкие АМС можно рассматривать в качестве защитных покрытий в термоядерных реакторах, где в результате реакций синтеза образуются ядра

He [1]. Поэтому представляет интерес исследование поверхности аморфных сплавов после облучения и пострadiационного отжига в вакууме.

Исходные образцы представляли собой аморфные и аморфно-кристаллические фольги систем Zr-Fe, Zr-Ti-Ni-Cu (только аморфные), Zr-Ti с содержанием циркония от 35 до 90 ат. %, которые были получены методом сверхбыстрой закалки из расплава в виде лент толщиной 30–60 мкм. Облучение проводилось ионами гелия энергией 40 кэВ дозами до $3 \cdot 10^{17}$ ион/см² при комнатной температуре. После облучения сплавы были отожжены в вакууме при температурах $T = 300, 400$ и 500 °С.

Фазовый состав образцов исследовался на дифрактометре ULTIMA IV в геометрии параллельного пучка с использованием медного излучения (0,15418 нм). Моделирование ионных пробегов, расчет сна выполнялся в программе SRIM [3]. Исследование микроструктуры поверхности проводилось методом растровой электронной микроскопии. Уточнение элементного состава проводилось методом рентгеноспектрального микроанализа.

В результате моделирования в программе SRIM были оценены длины ионных пробегов и величина сна для сплавов: ионы гелия энергией 40 кэВ проникают приблизительно на 200–240 нм, при этом для всех исследуемых составов максимальная величина сна составляет 11–12 при дозе облучения $3 \cdot 10^{17}$ ион/см².

Обнаружено, что облучение аморфных сплавов дозами до $3 \cdot 10^{17}$ ион/см² не приводит к перераспределению элементов в сплавах циркония, а также к их кристаллизации. Из рисунка 1 видно, что сплавы сохранили свою аморфную структуру при всех дозах облучения. В то время в аморфно-кристаллических образцах выявлено увеличение доли аморфной фазы после облучения ионами He ($3 \cdot 10^{17}$ см⁻²), что связано с аморфизацией, вызванного облучением ионами.

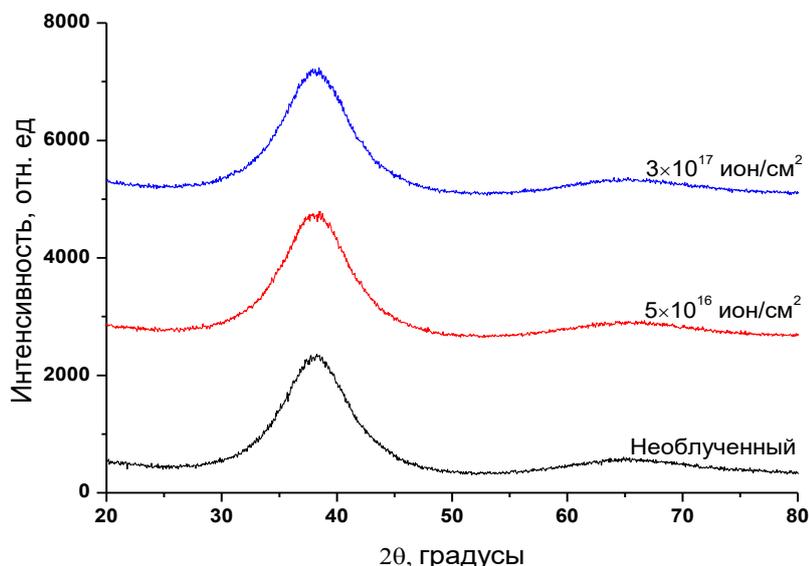


Рисунок 1 – Дифрактограммы аморфных сплавов системы Zr-Ti-Ni-Cu

Отжиг облученных сплавов проводился при температурах $T = 300, 400$ и 500 °С. При $T = 300$ °С все сплавы сохранили свою аморфную структуру. Повышение температуры отжига до $T = 400$ °С привело к кристаллизации аморфных и аморфно-кристаллических сплавов систем Zr-Ti и Zr-Fe. При $T = 500$ °С все образцы кристаллизовались. Таким образом температура кристаллизации сплавов системы Zr-Fe и Zr-Ti оказалась приблизительно на 100 °С меньше, чем сплавов системы Zr-Ti-Ni-Cu. Концентрация циркония и примесей в сплаве оказывает влияние на фазовый состав сплав при кристаллизации. Так, для сплавов системы Zr-Ti-Ni-Cu с концентрацией Ti 17 ат. %, Ni 15 ат. %, Cu 14 ат. % наблюдается появление новых фаз NiZr₂, CuTiZr, Zr₂Cu, в то время как увеличение доли примесей (Ti 20 ат. %, Ni 17 ат. %, Cu 15 ат. %) привело к появлению фаз Ti₃Ni₄ вместо Zr₂Cu.

Микроструктура поверхности аморфной фольги представлена на рисунке 2. Облучение с последующим отжигом не привело к радиационной эрозии поверхности. Это связано, прежде всего, с аморфной структурой, где в отсутствие жесткой кристаллической решетки не возникают микронапряжения, рост величины которых приводит к образованию трещин, блистеров, отшелушиванию поверхности, что можно наблюдать в кристаллических материалах [4]. Вдобавок, аморфная матрица является отличным стоком для дефектов. Последующий отжиг в вакууме также не привел к появлению блистеров на поверхности.

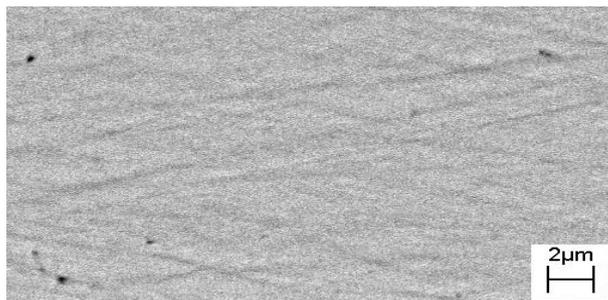


Рисунок 2 – РЭМ-изображение аморфной фольги системы Zr-Ti-Ni-Cu

Таким образом, было обнаружено, что АМС остаются аморфными после облучения ионами He (40 кэВ) при дозе $3 \cdot 10^{17}$ ион/см². При этом радиационной эрозии поверхности образцов не наблюдается. Последующий после облучения отжиг привел к кристаллизации сплавов систем Zr-Ti, Zr-Fe (при T = 400 °C) и Zr-Ti-Ni-Cu (при T = 500 °C). При меньших температурах отжига исследуемые образцы остались аморфными. Обнаружено, что элементный состав оказывает влияние также на образующиеся при кристаллизации фазы. Так, увеличение доли Ti в системе Zr-Ti-Ni-Cu с 17 до 20 ат. %, Ni с 15 до 17 ат. %, Cu с 14 до 15 ат. % привело к образованию новой фазы Ti₃Ni₄ вместо Zr₂Cu.

Список литературы

1. Behavior of high resistance to He⁺ induced irradiation damage in metal glass / Bin Wang [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 312 (2013) 84–89.
2. Reprint of «Blister formation in ZrN/SiN multilayers after He irradiation» / V. V. Uglov [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2018. – Vol. 355. – P. 311–317.
3. <http://www.srim.org>.
4. Features of microstructure of ZrN, Si₃N₄ and ZrN/SiN_x nanoscale films irradiated by Xe ions / V. V. Uglov [et al.] // Vacuum. – 2017. – Vol. 143. – P. 491–493.

In this paper, we consider the evolution of the microstructure and surface structure of amorphous zirconium-based metal glasses after irradiation with 40 keV He ions and thermal vacuum annealing.

Сугак Ярослав Николаевич, студент физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, yaroslav.sugak@bk.ru.

Научный руководитель – *Углов Владимир Васильевич*, доктор физико-математических наук, профессор, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, Uglov@bsu.by.

УДК 535.33+667.28

А. Ю. СУПОНЕНКО, И. А. ЗУЕВ, А. А. ТАБОЛИЧ

АНТИМИКРОБНАЯ АКТИВНОСТЬ ВОДОРАСТВОРИМЫХ ТРИКАРБОЦИАНИНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ

Получены результаты по антибактериальной активности водорастворимого трикарбоцианинового красителя. Установлено значительное отличие в эффективности повреждения грамположительных и грамотрицательных бактериальных штаммов при фотоинактивации с препаратом.

В настоящий момент большинство болезней, которые вызываются болезнетворными микроорганизмами, лечатся антибиотиками, противогрибковыми или противовирусными препаратами. Но микроорганизмы вырабатывают защитный механизм – резистентность, феномен устойчивости штамма возбудителей инфекции к действию одного или нескольких препаратов.

Одним из наиболее перспективных способов для борьбы с патогенными микроорганизмами является их фотодинамическая инактивация фотосенсибилизаторами (антимикробная фотодинамическая терапия) [1].

Так как антимикробная активность при фотодинамическом процессе обуславливается, как правило, свободорадикальными реакциями, то развитие резистентности к фотодинамической инактивации фактически невозможно [2].

Перспективными для использования в качестве фотосенсибилизаторов для фотодинамической антимикробной терапии являются трикарбоцианиновые красители. Некоторыми исследователями отмечено, что воспаленным тканям, как и опухолевым, также свойственна способность задерживать красители, и поэтому ткани, инфицированные патогенными бактериями и вирусами, могут выступать объектом для фотодинамического воздействия [3; 4; 5].

В данной работе исследуется трикарбоцианиновый краситель (ПК220) (рисунок 1), синтезированный в лаборатории спектроскопии НИИ прикладных физических проблем имени А. В. Севченко БГУ.

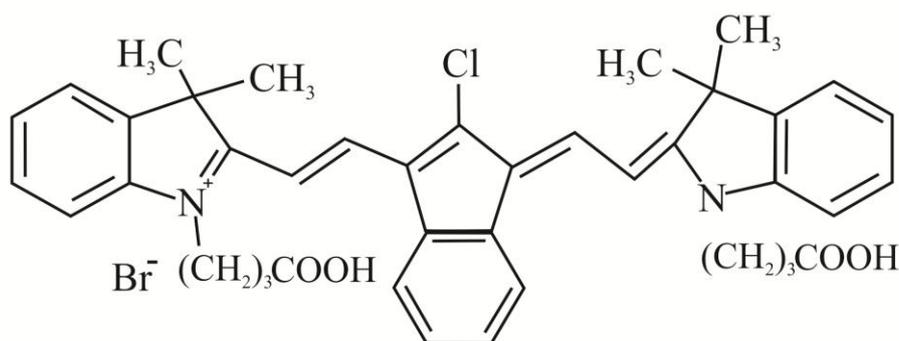


Рисунок 1 – Структурная формула ПК220

Для исследования антибактериальных свойств красителя использовались грамположительные бактериальные штаммы – *Staphylococcus aureus* и грамотрицательные – *Salmonella typhi*. В качестве питательной среды для культивирования микроорганизмов использовался мясопептонный бульон (МПБ) и изотонический раствор.

В процессе взаимодействия трикарбоцианинового красителя с бактериальной средой произошло обесцвечивание красителя. Грамположительные бактерии почти полностью обесцветили краситель. В образцах с грамотрицательными бактериями изменение цвета было не значительно. При высоких значениях концентраций проявлялась высокая темновая антибактериальная активность красителя. Зафиксировано уменьшение количества бактериальных колоний после облучения для обеих групп бактериальных штаммов (рисунки 2, 3, 4).

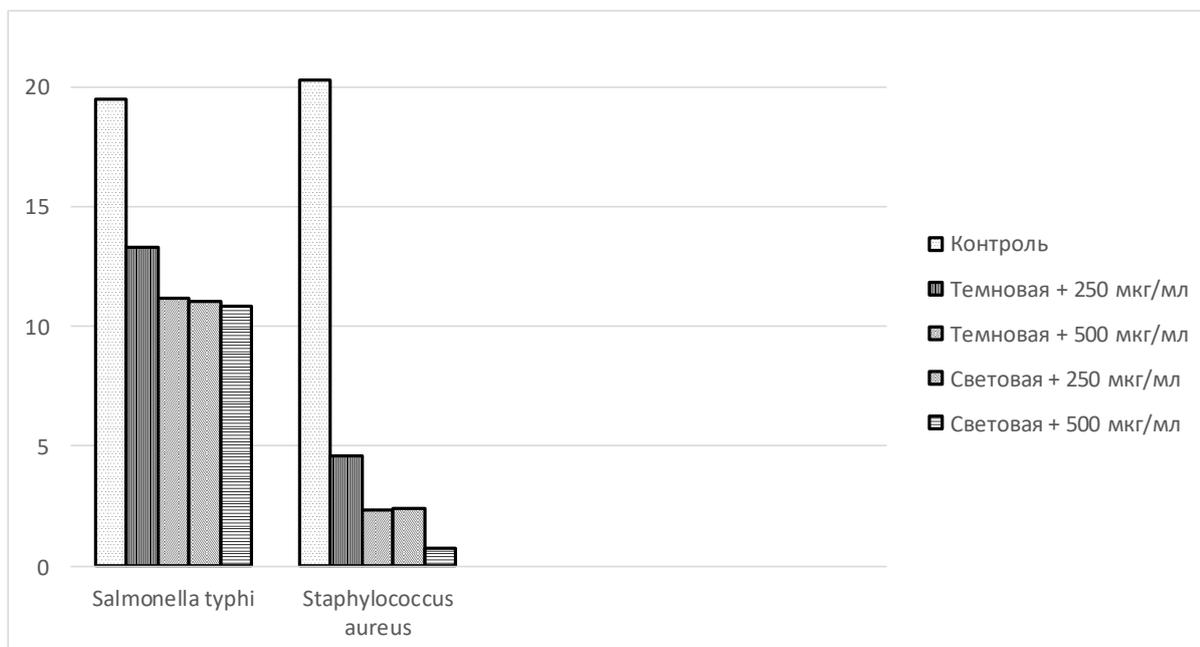
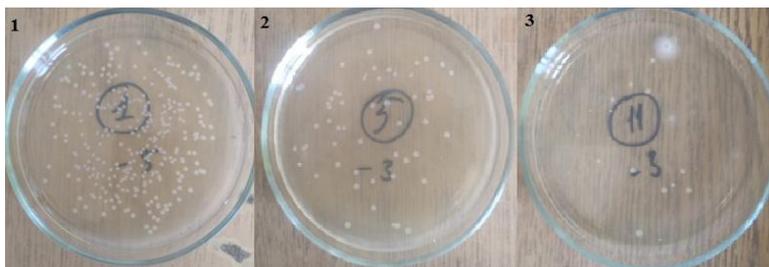
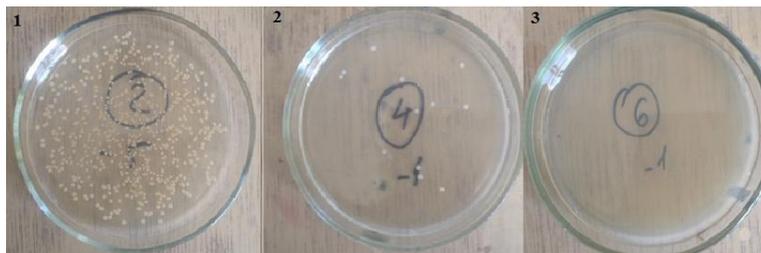


Рисунок 2 – Уменьшение количества жизнеспособных бактерий (количество бактерий указано в логарифмическом масштабе)



1 – контрольный образец, 2 – образец с красителем без облучения, 3 – образец с красителем после облучения

Рисунок 3 – Взаимодействие *Salmonella typhi* с исследуемым красителем (концентрация красителя 250 мкг/мл)



1 – контрольный образец, 2 – образец с красителем без облучения, 3 – образец с красителем после облучения

Рисунок 4 – Взаимодействие *Staphylococcus aureus* с исследуемым красителем (концентрация красителя 250 мкг/мл)

Обнаружено, что краситель влияет на размеры колоний. Рост клетки обуславливается репликацией ДНК, фотосенсибилизатор замедляет этот процесс. В нормальных условиях на рост колоний влияет только концентрация бактерий в среде, так как идет конкуренция за питательный субстрат. В рассматриваемом же случае концентрация колоний невелика, и, как следствие, конкуренция сводится к минимуму. Так же обнаружено влияние самого излучения на рост. В образцах, которые подвергались облучению, колонии меньше по размерам.

В ходе проведения исследовательской работы была установлена антимикробная активность водорастворимого красителя. При темновой активности количество грамотрицательных бактерий снизилось на пять порядков, при облучении на семь. Для грамположительных бактериальных штаммов наблюдалась почти полная гибель микроорганизмов. Краситель влиял на рост и морфологию бактериальных колоний.

Список литературы

1. Bactericidal effect of photodynamic therapy against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* strain with the use of various porphyrin photosensitizers / M. Grinholc [et al.] // Acta Biochim. Pol. – 2007. – Vol. 54 (3). – P. 665–670.
2. The role of photosensitizer molecular charge and structure on the efficacy of photodynamic therapy against *Leishmania parasites* / O. E. Akilov [et al.] // Chem. Biol. – 2006. – Vol. 13 (8). – P. 19–847.
3. Bactericidal effects of photoactivated porphyrins – an alternative approach to antimicrobial drugs / Z. Malik, J. Hanania, Y. Nitran // J. Photochem. Photobiol. B. – 1990. – Vol. 5 (3–4). – P. 281–293.
4. Hamblin, M. R. Can surgical site infections be treated by photodynamic therapy? / M. R. Hamblin, T. Dai // Photodiagnosis Photodyn. Ther. – 2010. – Vol. 7 (2). – P. 6–136.
5. Воропай, Е. С. Особенности флуоресценции трикарбоцианиновых красителей – фотосенсибилизаторов нового поколения / Е. С. Воропай, М. П. Самцов // Спектроскопия и люминесценция молекулярных систем / Бел. гос. ун-т ; под ред. Е. С. Воропая, К. Н. Соловьева, Д. С. Умрейко. – Минск, 2002. – С. 181–192.

The results on the antibacterial activity of the studied water-soluble tricarbocyanine dye are obtained. A significant difference was found in the effectiveness of damage to gram-positive and gram-negative bacterial strains during photoinactivation with the drug.

Супоненко Алина Юрьевна, студентка 3 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, suponenkoalina@gmail.com.

Зувев Иван Анатольевич, студент 5 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, ivanzuev@tut.by.

Таболіч Анастасія Александровна, аспирант физического факультета Белорусского государственного университета, Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь, tabolich.nastya@gmail.com.

Научный руководитель – *Ляшенко Людмила Сергеевна*, кандидат физико-математических наук, доцент, физический факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, lyashenko@bsu.by.

А. В. ТИТОВА, А. С. ТРУБЕЦКАЯ, Г. Т. МАСЛОВА

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОРФОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА
И ИК СПЕКТРОВ ВЫСОХШИХ КАПЕЛЬ ПЛАЗМЫ КРОВИ
ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ОПУХОЛЕЙ ГОЛОВНОГО МОЗГА**

Исследование фазового состояния белка и факторов, влияющих на его организацию при физиологических и патологических процессах, представляет перспективное направление как для фундаментальной науки, так и для практической медицины. Показано, что морфологический анализ в совокупности с методом ИКС позволяет с высокой чувствительностью и специфичностью выявлять опухолевый процесс, так как этот процесс меняет ИК-спектры многих органических молекул. Поэтому исследование особенностей ИК-спектров биологических жидкостей может быть важным дополнением для развития эффективных и безопасных методов диагностики и лечения онкологических заболеваний.

В механизме патогенеза раковых образований главнейшим звеном процесса является нарушение самоорганизации белка на клеточном уровне. Фазию (высохшая капля) можно рассматривать как стабильное отображение многоэтапной и многоуровневой модификации состава биосреды по компонентам, что позволяет при визуализации отличий использовать метод сравнительной морфологической картины высохших капель биологической жидкости (БЖ) в диагностических целях заболеваний различного рода [1].

Хотя при раковой патологии самоорганизацию белка рассматривают в основном на молекулярном и атомном уровне, тем не менее изучение феноменологических исследований дает убедительные качественные результаты. При сравнении морфологической картины высыхающих капель БЖ больных с онкопатологией обнаруживается ряд отличий в симметрии, характерной для здорового человека. Рост клеток происходит с появлением асимметричных дефектов, сущностным нарушением упорядочности в высыхающей капле за счет неравномерного деления белка на блоки. Фазию (высохшую каплю) можно рассматривать как стабильное отображение многоэтапной и многоуровневой модификации состава биосреды по компонентам, что позволяет при визуализации отличий использовать метод сравнительной морфологической картины высохших капель биологической жидкости (БЖ) в диагностических целях заболеваний различного рода [2].

Характерной особенностью течения опухолей является отсутствие симптоматики в начальном периоде заболевания. Эффективность лечения существенно возрастает при их выявлении на ранней стадии заболевания. В области клинической диагностики быстрыми темпами развивается диагностика патологических состояний организма на основе морфологического анализа фаций БЖ. Микроструктурные параметры представлены неоднородностями по форме, размеру и их расположению в фации.

Сделаны значительные шаги перехода от формального подхода к изучению морфологии фации к изучению механизмов структурирования. Результаты исследований окислительной модификации белков плазмы крови предложены для использования в дооперационной диагностике стадии злокачественного новообразования эпителия.

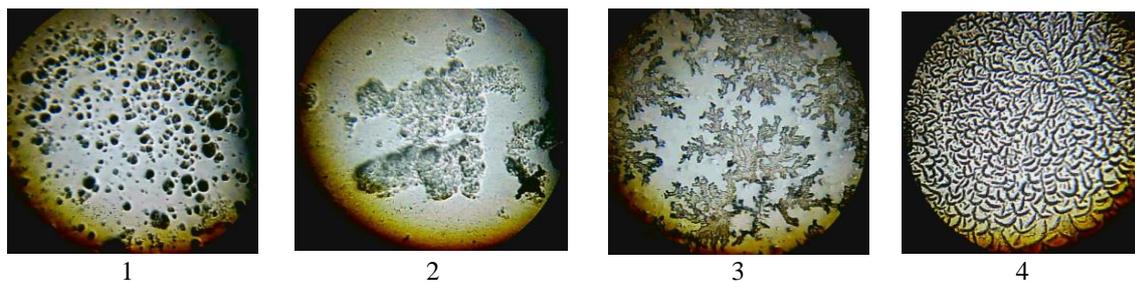
Морфология фации определяется скоростью образования коацерватов в процессе высыхания капли. На это влияет белковая составляющая сывороточного альбумина человека (САЧ), а также количество и качество солей, которые также являются структурирующим фактором. Авторы работы [1] показали, что существенное влияние оказывает не только солевой состав САЧ, но и специфичность строения самого альбумина, который по своей природе является полиамфолитом. САЧ является уникальным высокочувствительным белком.

При изучении морфологии фации плазмы крови пациентов с ОГМ каплю (10 мкл) наносили на поверхность тщательно промытой подложки из ПММА, высушивали при комнатной температуре течение 90–100 минут. Для получения снимков использовали оптический микроскоп Биолам со светодиодной подсветкой (на пропускание) и веб-камерой, работающий с компьютером по USB-2 порту.

Для получения спектров ИК поглощения фаций плазмы крови использовался Фурье-спектрометр Vertex 70 фирмы Bruker. Образцы плазмы крови в объеме 3 мкл наносили на подложку из стекла КРС-5 и высушивали в течение часа при комнатной температуре.

Морфология центральной части высохшей капли плазмы крови пациентов с онкопатологией головного мозга (1–3, ув. в 300 раз) и донора (4) (ув. в 130 раз) приведены на рисунке 1.

Однородная, равномерная зона мелких завитков характерна для центра фации доноров. При патологии отклонения, обусловленные нарушением стандартных соотношений «белок-соль», вызывают нерегулируемые конформационные изменения, связанные с уникальностью альбумина (наличие амино- и карбоксильных групп в его молекуле – полиамфолитность). Наблюдаем совершенно очевидное существенное отличие структуры фации пациентов от донора.



1 – глиобластома GIV правой лобно-височной области ГМ с ростом в базальные ядра;
2 – глиобластома GIV правой лобной доли ГМ; 3 – диффузная астроцитомы GII левой островковой доли с распространением на лобную и височную доли ГМ; 4 – донор

Рисунок 1 – Снимки высохших капель плазмы пациентов с диагнозом опухоль головного мозга

Одним из фундаментальных методов исследования органических веществ, который широко используется в химии, биологии и медицине, является инфракрасная (ИК) спектроскопия. Потенциальным возможностям ИК-спектроскопии для диагностики посвящено большое количество работ [3]. ИК-спектроскопия не только используется в клинической лабораторной диагностике в настоящее время, но и характеризуется высоким потенциалом обнаружения ранних биохимических отклонений при развитии патологического процесса [3].

При использовании спектров ИК поглощения исследования проводили в области спектра $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$. Наиболее информативной областью является область $1200\text{--}950\text{ см}^{-1}$ [3]. Эта область позволяет выявить весь спектр веществ в плазме крови, содержащих связи P–O и C–O, простые и сложные эфирные связи C–OO, P–OO, к которым относятся все липиды, фосфорилированные белки, углеводы и другие соединения. Наличие amino- и карбоксильных групп позволяет широко использовать его конформационную динамичность, обуславливающую структурные перестройки и его способность к агрегации с образованием коагулирующих центров.

На рис. 2 приведен ряд спектров образцов высохших капель САЧ доноров (д), пациентов с астроцитомой (а) и глиобластомой (г).

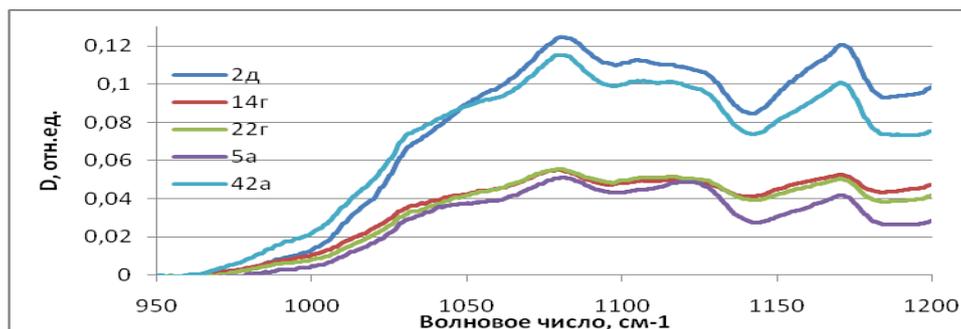


Рисунок 2 – Спектры ИК поглощения образцов плазмы крови пациентов и здорового человека (2д), в области $950\text{--}1200\text{ см}^{-1}$

Из рисунка видно, что соотношения интенсивностей полос в ИК-спектрах пациентов и донора заметно отличаются.

Следует отметить, что опухоли ГМ – быстрорастущие с постоянно меняющимся генотипом, что приводит к множественным мутациям и, соответственно, изменениям структурных компонентов опухолевых клеток. Метод ИКС позволяет с высокой чувствительностью и специфичностью выявлять не только разные РНК, белки, но и жиры, углеводы в плазме крови. Опухолевый процесс меняет ИК-спектры многих органических молекул. Поэтому исследование особенностей ИК-спектров БЖ может быть важным дополнением для развития эффективных и безопасных методов диагностики и лечения онкологических заболеваний.

Список литературы

1. Максимов, С. А. Морфология твердой фазы биологических жидкостей как метод диагностики в медицине / С. А. Максимов // Бюллетень сибирской медицины. – 2007. – № 4. – С. 80–85.
2. Бузоверя, М. Э. Экспериментальное исследование микроструктур фаций сывороточного альбумина / М. Э. Бузоверя, Ю. П. Щербак, И. В. Шишпор // ЖТФ. – 2012. – Т. 82, вып. 9. – С. 87–94.
3. Инфракрасная спектроскопия сыворотки крови в диагностике онкозаболеваний / Р. Н. Комаров [и др.] // Нижегород. мед. журн. – 2006. – № 1. – С. 98–100.

The study of the phase state of a protein and the factors affecting its organization in physiological and pathological processes is a promising direction for both basic science and practical medicine. It is shown that morphological analysis in conjunction with the IRS method allows for high sensitivity and specificity to identify tumor process, since this process changes the IR spectra of many organic molecules. Therefore, the study of the features of the IR spectra of biological fluid can be an important addition to the development of effective and safe methods of diagnosis and treatment of cancer.

Титова Анастасия Владимировна, студентка 2 курса биологического факультета (кафедра физиологии человека и животных) Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.

Трубецкая Антонина Сергеевна, студентка 2 курса биологического факультета (кафедра физиологии человека и животных) Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.

Научные руководители – *Маслова Галина Трофимовна*, кандидат биологических наук, доцент кафедры физиологии человека и животных биологического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.

Зажогин Анатолий Павлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, zajogin_an@mail.ru.

УДК 533.9.082.5;543.423;621.373.826

А. В. ТИТОВА, А. С. ТРУБЕЦКАЯ, Г. Т. МАСЛОВА

МОРФОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ И ЛАЗЕРНАЯ АТОМНО-ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ ФАЦИЙ КАПЕЛЬ ПЛАЗМЫ КРОВИ В ДИАГНОСТИКЕ ОПУХОЛЕЙ ГОЛОВНОГО МОЗГА

Рассмотрены вопросы разработки методик морфологического анализа и полуколичественной оценки локального пространственного распределения кальция в фациях капель плазмы крови человека методом локальной атомно-эмиссионной многоканальной спектроскопии. Показано, что при высыхании плазмы крови пациентов с астроцитомой на поверхность фации вытесняется NaCl, который, кристаллизуясь, создает дендритную структуру. Результаты таких оценок могли бы служить основой при проведении диагностических исследований различных заболеваний человека.

В механизме патогенеза раковых новообразований главным звеном следует считать нарушение порядка самоорганизации белка на клеточном уровне [1]. Наиболее близким эталоном плазмы крови является сывороточный альбумин человека. В последние годы биологические жидкости (БЖ) стали одним из основных объектов исследования с применением инструментальных, в том числе и спектральных методов анализа. Такие исследования актуальны при диагностике врожденных патологий, экологически обусловленных заболеваний, профессиональных заболеваний, связанных со спецификой промышленного производства, и др.

Наличие альбумина в крови в пределах физиологической нормы (45–55 % от общего белка) далеко не всегда отражает полноценность его транспортной функции. В связи с этим для клиницистов большое значение имеет оценка степени заблокированности центров связывания альбумина.

С этой целью для получения дополнительной диагностической информации в настоящей работе изучены морфоструктура, а также количественное пространственное распределение кальция в фациях плазмы крови пациентов.

Для изучения структурирования фации капли плазмы крови пациентов с опухолью головного мозга (ОГМ) объемом 10 мкл наносили на поверхность тщательно промытой подложки из ПММА, высушивали при комнатной температуре в течение 90–100 минут. Для получения снимков фаций использовали оптический микроскоп Биолам со светодиодной подсветкой (на пропускание) и веб-камерой, работающий с компьютером по USB-2 порту.

Для оценки локального пространственного распределения кальция использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. Все эксперименты проводили в атмосфере воздуха при нормальном атмосферном давлении. Лазерное излучение фокусировали на образец с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 100 мм. Размер пятна фокусировки примерно 50 мкм.

Морфология центральной части высохшей через 90 минут капли плазмы крови пациентов с онкопатологией головного мозга (1–3, ув. в 300 раз) и донора (4, ув. в 130 раз) приведена на рис. 1.

Было найдено, что картина структурирования фации всех пациентов с ОГМ, пусть разной степени, отличается от нормотипа, что является признаком наличия патологии. Идентифицируются различные типы фаций.

Морфология фации определяется скоростью образования коацерватов в процессе высыхания капли. На это влияет белковая составляющая альбумина человека, а также количество и качество солей, которые также являются структурирующим фактором.



1 – гемистоцитарная астроцитома G II левой лобной доли ГМ; 2 – диффузная астроцитома GIII левой островковой доли с распространением на лобную и височную доли ГМ; 3 – глиобластома GIV правой лобно-височной области ГМ с ростом в базальные ядра; 4 – донор

Рисунок 1 – Снимки фации плазмы крови пациентов

Следует отметить, что в зависимости от строения клеток, участвующих в формировании новообразований, астроцитома может носить обычный или особый характер. Это подтверждается различием наблюдаемых структур (дендридная морщинистость, трещины «серебра», гребешковые трещины) у пациентов 1 и 2. У пациента 3 в фации обильно присутствуют хаотично разбросанные воронки. Вторая группа включает пилоцитарную или пиллоидную, субэпендимальную (гломерулярную) и микроцистную церебеллярную астроцитомы. Возможно, это определяет различие в морфологии капель пациентов 1, 2 и пациента 3, для которого характерны гребешковые трещины. Для донора характерно достаточно равномерное распределение небольших жгутовых трещин.

Для оценки локального пространственного распределения кальция использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. Все эксперименты проводили в атмосфере воздуха при нормальном атмосферном давлении. Лазерное излучение фокусировали на образец с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 100 мм. Размер пятна фокусировки примерно 50 мкм. Распределение кальция по поверхности и слоям фации представлено на рисунке 2.

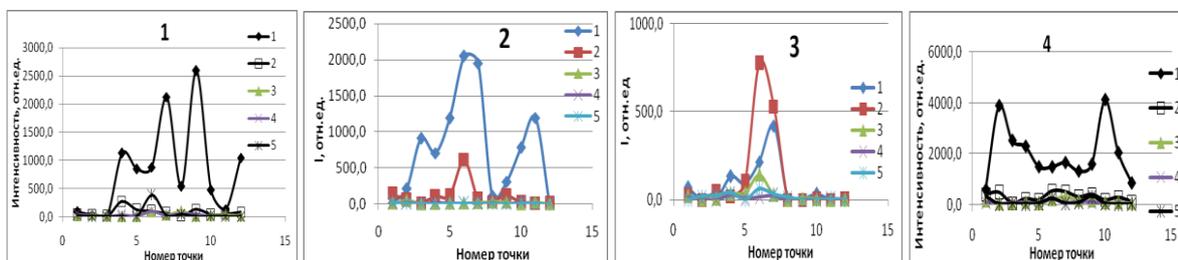


Рисунок 2 – Интенсивность линии Ca II (393,239 нм) в атомно-эмиссионных спектрах плазмы крови пациентов

Очевидны существенные различия в характере распределения кальция в фации плазмы крови пациентов. В процессе высыхания капель происходит хаотичное образование центров коагуляции, наблюдается разброс концентрации кальция как по поверхности, так и слоям, что свидетельствует об изменении связывающей способности альбумина при патологии. Это приводит к аномальной коагуляции белка и увеличению концентрации кальция в центре фации и в более глубоких слоях, что не характерно для здорового человека.

Максимальные концентрации кальция в центральной части фации особенно характерны для пациента 3 с более глубокой стадией поражения мозга. У него же максимальное содержание кальция приходится на второй слой. У пациентов 1 и 2 аномальное структурирование белка хотя в значительной мере происходит на поверхности высохшей капли, но также в ее центральной части. Также видно, что у больных с ОГМ концентрация кальция ниже, чем у здорового человека.

Приведенные данные показывают, что у больных с ОГМ концентрация кальция ниже, чем у здорового человека. Кроме того, в процессе высыхания капель происходит хаотичное образование центров коагуляции, наблюдается разброс концентрации кальция как по поверхности, так и слоям. Налицо – изменение связывающей способности альбумина при патологии. Это приводит к аномальной коагуляции белка и увеличению концентрации кальция в более глубоких слоях, что совершенно не характерно для здорового человека.

Хорошо известно, что у здорового человека кальций распределен только по поверхности высохшей капли, в центральной части капли оценивается доля ионизированного кальция. При равномерной диффузии БЖ к краям в процессе испарения жидкости максимальная концентрация связанного кальция приходится на краевой белковый валок. У пациентов 1 и 2 аномальное структурирование белка в значительной мере происходит и в верхних слоях высыхающей капли плазмы крови. При этом на поверхность фации вытесняется NaCl, который кристаллизуясь, создает дендритную структуру.

Таким образом, по характеру локального послойного распределения кальция в высохшей капле с привлечением картины ее морфологии можно оценить степень патологии пациента.

Настоящее исследование показало, что анализируя поверхность высохшей капли БЖ по структурным проявлениям и изменению концентрации кальция по поверхности и слоям можно дать достоверную оценку патологических изменений фации плазмы крови пациентов, что может быть использовано для поиска маркеров заболеваний.

Результаты таких оценок могут также служить основой при проведении диагностических исследований, поскольку известно, что на начальных стадиях развития болезни общее содержание макроэлементов в БЖ организма, как правило, лежит в пределах нормы.

Список литературы

1. Максимов, С. А. Морфология твердой фазы биологических жидкостей как метод диагностики в медицине / С. А. Максимов // Бюллетень сибирской медицины. – 2007. – № 4. – С. 80–85.

The paper deals with the development of methods for morphological analysis and semi-quantitative assessment of the local spatial distribution of calcium in the facies of human plasma droplets using local atomic emission multichannel spectrometry. It is shown that when the blood plasma of patients with astrocytoma dries, NaCl is displaced to the facies surface, which crystallizes and creates a dendritic structure. The results of such assessments could serve as a basis for conducting diagnostic studies of various human diseases.

Титова Анастасия Владимировна, студентка 2 курса биологического факультета (кафедра физиологии человека и животных) Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.

Трубецкая Антонина Сергеевна, студентка 2 курса биологического факультета (кафедра физиологии человека и животных) Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.

Научные руководители – *Маслова Галина Трофимовна*, кандидат биологических наук, доцент кафедры физиологии человека и животных биологического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.

Зажогин Анатолий Павлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, zajogin_an@mail.ru.

УДК 533.9.082.5

Ш. Х. ХАЛИФАЕВА, С. Ф. АБДУЛЛАЕВ, В. А. МАСЛОВ

МЕЖГОДОВЫЕ ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СОСТАВЕ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ ЮГО-ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ТАДЖИКИСТАНА

Описаны источники пылевых вторжений на территорию Таджикистана. Проведен анализ элементного состава пылевого аэрозоля. Рассмотрены межгодовые вариации тяжелых металлов в составе пылевого аэрозоля.

За последние пять лет в Таджикистане зарегистрированы более шестисот стихийных бедствий, в которых погибли более ста человек. Эти явления часто связывают с глобальными изменениями климата. Говоря о них, чаще всего имеют в виду таяние ледников и уменьшение осадков в горах. Но не менее важной проблемой, связанной с изменением климата, являются участвовавшие в стране пыльные бури.

В течение 30 лет количество пылевых бурь в Таджикистане увеличилось как минимум в 10 раз. В начале 90-х годов они происходили всего два-три раза в год, а в последние годы регистрируется до 35 бурь каждый год.

Население, которое живет на территории юго-центральной части республики, хорошо знакомо с этим явлением: когда уходят холода, учащаются пылевые вторжения. В народе пыльные бури часто называют «афганец», потому что эти пылевые потоки вторгаются с территории Афганистана. На самом деле бури приходят на территорию Таджикистана из самых разных регионов – даже из стран Африки.

В лаборатории физики атмосферы Физико-технического института Академии наук Таджикистана ведется мониторинг и исследование этого явления.

С 2007 по 2019 гг. было собрано 88 проб атмосферного аэрозоля с территории юго-центральной части Таджикистана. Пробы отбирались путем естественного осаждения аэрозоля на поверхность пленки ($10 \times 10 \text{ м}^2$) и пластиковые ванночки. В лаборатории с помощью прибора СПЕКТРОСКАН МАКС методом рентгенофлуоресцентного анализа определялся элементный состав проб. После определения элементного состава рассматривались статистические характеристики содержания тяжелых металлов, межгодовые и сезонные вариации их содержания в составе атмосферной пыли.

На рис. 1 представлена межгодовая вариация содержания тяжелых элементов Co, As, Ni и Pb в составе пыли юго-центральной части Таджикистана. В 2007–2010 гг. средняя концентрация мышьяка выше, чем у остальных металлов. Средняя концентрация никеля в 2011 и 2019 гг., а свинца в 2013 и 2014 гг. являются максимальными. В 2015 г. значения кобальта и мышьяка, а также никеля и свинца почти равны друг другу.

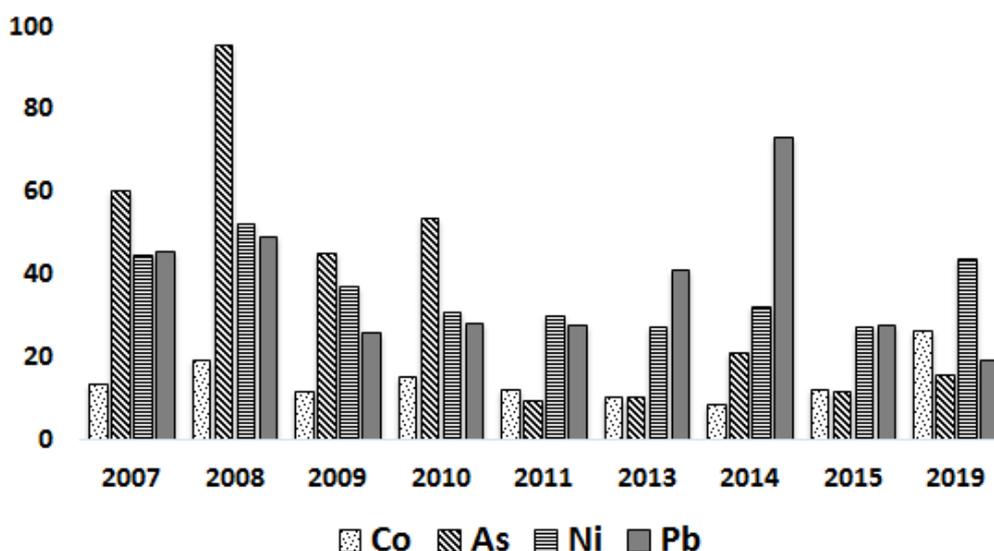


Рисунок 1 – Межгодовая вариация концентраций ряда тяжёлых металлов (кобальт, мышьяк, никель, свинец) в составе атмосферного аэрозоля юго-центральной части Таджикистана

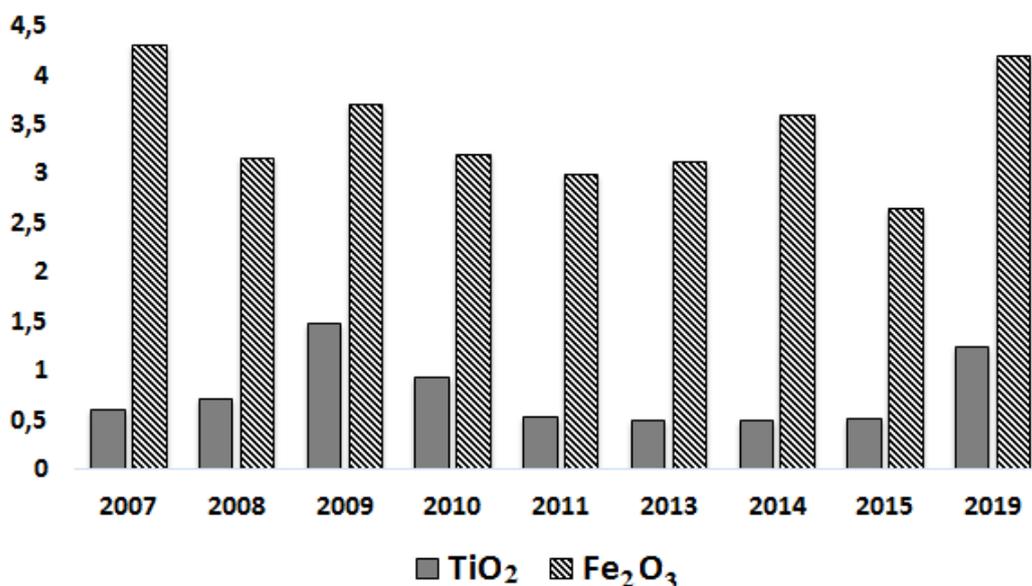


Рисунок 2 – Межгодовая вариация концентрации диоксида титана и оксида железа в составе атмосферного аэрозоля юго-центральной части Таджикистана

Концентрации диоксида титана (TiO_2) и оксида железа (Fe_2O_3) в аэрозоле измеряются процентами. Как видно на рис. 2, в течение всего периода наблюдений концентрация Fe_2O_3 в разы превышает концентрацию диоксида титана.

На рис. 3 приведены межгодовые вариации концентраций цинка, меди, хрома и ванадия. Наиболее сильное загрязнение территории создается цинком. Среднее содержание цинка максимально в 2007–2009, 2011 и 2013 годах, а уровень концентрации остальных тяжёлых металлов близки. В 2010 г. у меди была самая высокая средняя концентрация в аэрозоле. В 2014, 2015 и 2019 годах концентрации всех элементов были близки.

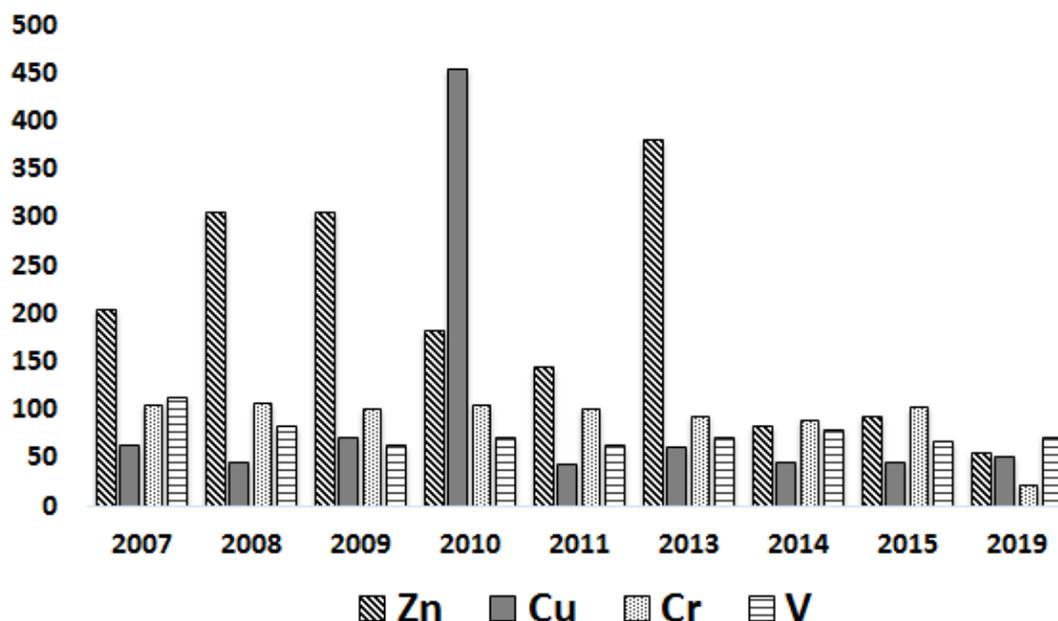


Рисунок 3 – Межгодовая вариация концентраций тяжёлых металлов (цинк, медь, хром и ванадий) в атмосферном аэрозоле юго-центральной части Таджикистана

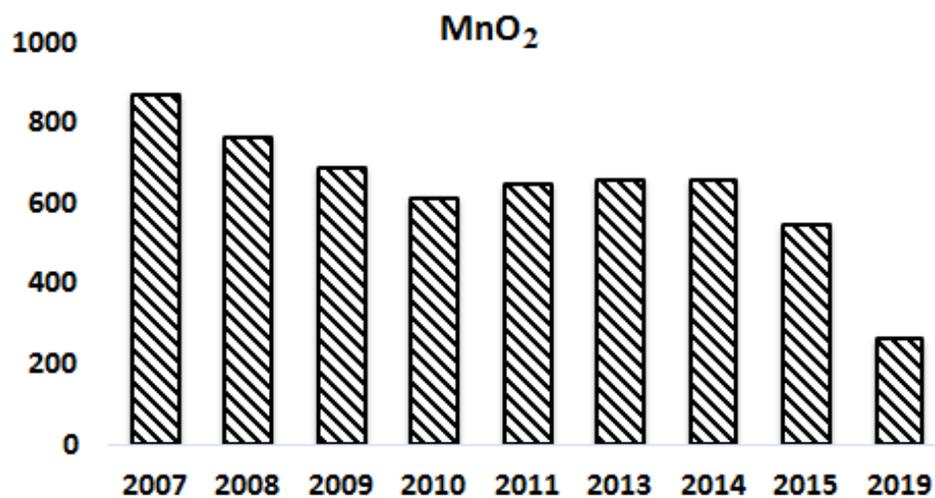


Рисунок 4 – Межгодовая вариация концентраций диоксида марганца в составе атмосферного аэрозоля юго-центральной части Таджикистана

Максимальная средняя концентрация диоксида марганца наблюдалась в 2007 г., средняя минимальная содержания MnO₂ в 2019 году. Начиная с 2008 по 2015 г. средняя концентрация диоксид марганца почти одинаковы (рис. 4.).

Список литературы

1. Ветошкин, А. Г. Источники загрязнения гидросфер / А. Г. Ветошкин // Процессы и аппараты защиты гидросфер. – Пенза, 2004.
2. Чертко, Н. К. Биологическая функция химических элементов : справ. пособие / Н. К. Чертко. – Минск, 2012. – 172 с.
3. The elemental composition of soils and dust aerosol in the south-central part of Tajikistan / F. S. Abdullaev [et al.] // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2015. – № 28. – P. 347–358.
4. Динамика распределения тяжелых металлов и радиоактивных изотопов в образцах почвы и пылевого аэрозоля юга Таджикистана. / С. Ф. Абдуллаев [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27, № 03. – С. 207–214.
5. Kulmatov, R. Distribution of heavy metals in atmospheric air of the arid zones in Central Asia / R. Kulmatov, M. Hojamberdiev // Air Quality, Atmosphere & Health. – 2010. – Vol. 3, № 4. – P. 183–194.

The sources of dust intrusions into the territory of Tajikistan are described. The elemental composition of dust aerosol is analyzed. The interannual variations of heavy metals in the composition of dust aerosol are considered.

Халифаева Шохина Хуриеджоновна, аспирант лаборатории физики атмосферы Физико-технического института имени С. У. Умарова АН Республики Таджикистан, Душанбе, shohina93@inbox.ru.

Абдуллаев Сабур Фузайлович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующей лабораторией физики атмосферы Физико-технического института имени С. У. Умарова АН Республики Таджикистан, Душанбе, sabur.f.abdullaev@gmail.com.

Маслов Владимир Анатольевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физики атмосферы Физико-технического института имени С. У. Умарова АН Республики Таджикистан, Душанбе, vamaslov@inbox.ru.

Научный руководитель – *Абдуллаев Сабур Фузайлович*, Физико-технический институт имени С. У. Умарова АН Республики Таджикистан, Душанбе.

УДК 535.375.54

В. А. ЦВЕТКОВ

СДВИГ ПОЛОС КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ В ТВЁРДЫХ РАСТВОРАХ «КРЕМНИЙ–ГЕРМАНИЙ», ОБРАБОТАННЫХ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМОЙ

Исследование спектров комбинационного рассеяния света (КРС) с помощью рамановской спектроскопии проводилось для твердых растворов «кремний–германий», обработанных высокочастотной водородной плазмой. Обнаружено влияние водорода на частотный сдвиг однофоновых пиков КРС.

Водород является важной технологической примесью для твердых растворов кремний-германий, влияющий на оптические и электрические свойства этих материалов. В свою очередь важен контроль состава и деформации пленок $Si_{1-x}Ge_x$ (x – доля содержания германия), что связано с практической значимостью таких структур для создания приборов оптоэлектроники. Спектры КРС позволяют анализировать состав структуры твердых растворов [1]. Целью данной работы являлось исследование спектров КРС твердых растворов $Si_{1-x}Ge_x$, обработанных водородной плазмой.

Для экспериментов использовались пленки толщиной (1–2) мкм, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на кремниевой подложке с использованием переходного слоя [2]. Образцы обрабатывались высокочастотной (13,56 МГц) водородной плазмой при температуре подложки 150 °С в течение 10 часов.

Спектры КРС записывались при комнатной температуре с помощью микроРамановского спектрометра *Nanofinder HE (Lotis III)*. Регистрация спектров осуществлялась по схеме обратного рассеяния, разрешение спектрометра составляло 0,8 см⁻¹. Подводящая к образцу мощность составляла 2 мВт, а диаметр возбуждающего пучка – около 1 мкм. Использовалось возбуждение излучением твердотельного лазера с длиной волны 532 нм.

В работе были измерены спектры КРС для твердых растворов $Si_{1-x}Ge_x$ с содержанием германия в интервале (0 < x < 0,5). На рисунке 1 представлены спектры твердого раствора для $x = 0,3$ до (1) и после (2) обработки водородом. Линии спектра нормированы на максимум интенсивности полосы однофоновых пиков $Si-Si$. Следует отметить, что наряду с известными модами $Si-Si$ и $Ge-Ge$ [3], наблюдались и промежуточные линии на частотах в области 400 и 426 см⁻¹, отвечающие за связь $Si-Ge$ [4]. Первая полоса, при 400 см⁻¹,

присутствовала во всех образцах, а вторая, в области 426 см^{-1} , наблюдалась только в образцах с высокой концентрацией германия, и ее интенсивность плавно уменьшалась, полностью исчезая при $x < 0,12$.

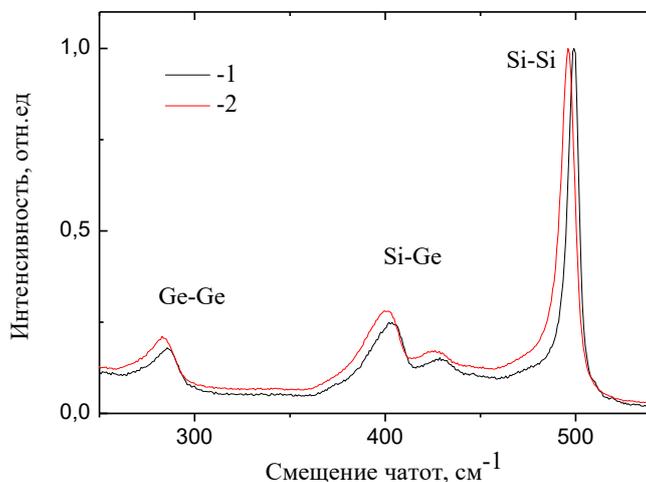


Рисунок 1 – Спектры КРС для $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0,3$) до (1) и после (2) обработки водородной плазмой

Было установлено, что в зависимости как от содержания германия в образце, так и от воздействия водородной плазмы, максимумы полос в спектрах изменяли свое частотное положение.

На рисунке 2 представлена зависимость смещения полос колебаний Si-Ge (а), Ge-Ge (б) и Si-Si (в) от концентрации германия в образце. На рисунке цифрой 1 обозначены кривые для твердых растворов в исходном состоянии. Для образцов, обработанных в плазме, кривые обозначены цифрой 2.

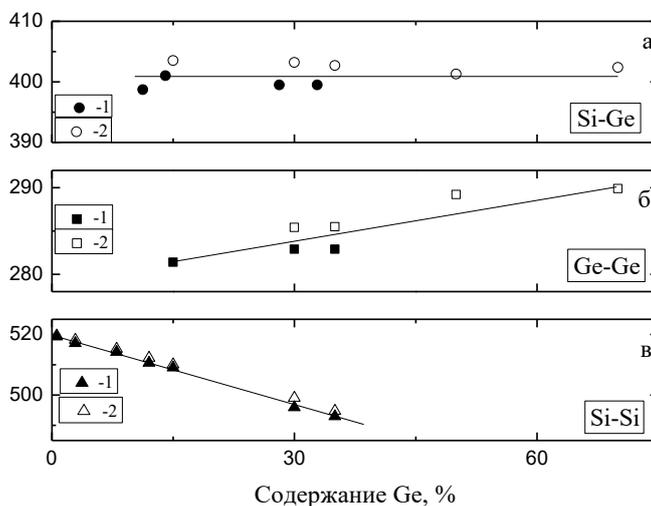


Рисунок 2 – Зависимость смещения максимумов полос КРС от содержания германия (%) для $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что смещение максимумов полос в спектрах КРС происходит как за счет изменения концентрации германия, так и за счет влияния водорода на структуру кристаллической решетки.

Список литературы

1. Определение состава и механических деформаций в $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ -гетероструктурах из данных спектроскопии комбинационного рассеяния света: уточнение параметров модели / В. А. Володин [и др.] // ФТП. – 2006. – Т. 40, № 11. – С. 1349–1355.

2. Strain-relaxed SiGe/Si heteroepitaxial structures of low threading-dislocation density / P. I. Gaiduk [et al.] // Thin Solid Films. – 2000. – Vol. 40, № 367. – P. 120–125.
3. В. А. Гайслер, О. А. Кузнецов, И. Г. Неизвестный, Л. К. Орлов, М.П. Синюков, А. Б. Талочкин. ФТТ 31, 392 (1989).
4. Feldman D. W., Askin M., Parker H. Jr. // Phys. Rev. Lett. 1966. V. 17. N 24. P. 1209–1212.

Raman spectrometry has been used to study Raman light scattering spectra for solid solutions of silicon-germanium treated with high -frequency hydrogen plasma. The shift of the Raman light scattering bands due to scattering on the vibrations of bonds with hydrogen atoms is revealed.

Цветков Владимир Александрович, студент физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, cvetkov1994g@gmail.com.

Научные руководители – *Петух Алла Николаевна*, кандидат физико-математических наук, заведующий учебной лабораторией Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, petuch@bsu.by.

Гиро Алексей Владимирович, старший преподаватель кафедры энергофизики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, giro@bsu.by.

УДК 539.21

В. В. ШЕВЕЛЁВА

КИНЕТИКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОКИСЛЕНИЯ ЦИРКОНИЯ, МОДИФИЦИРОВАННОГО ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ

Изучено влияние плазменной обработки на кинетику высокотемпературного окисления циркония. С помощью рентгеноструктурного анализа установлено образование оксидных фаз. Также изучено изменение массы с течением времени на различных образцах.

Цирконий является одним из основных материалов ядерной энергетики, который используется при изготовлении оболочек ТВЭЛов. Однако в случае аварийных ситуаций происходит взаимодействие циркония с теплоносителем (водой), приводящее его к интенсивному окислению и деградации физико-механических свойств. Для снижения скорости окисления оболочек ТВЭЛов используют различные методы модифицирования поверхности, в частности, нанесение защитных покрытий, легирование дополнительными элементами, обработка концентрированными потоками энергии. Такого типа модифицирование способствует изменению структурно-фазового состояния приповерхностного слоя и, как следствие, оказывает влияние на диффузионные процессы [1].

В данной работе рассматривается кинетика высокотемпературного окисления образцов циркония, подвергнутого высокоэнергетическому воздействию компрессионных плазменных потоков (КПП), и основные механизмы коррозионных процессов.

Объектами исследования в данной работе являлись пластины технически чистого циркония с размерами 10×10 мм и толщиной 2 мм. После модификации поверхности компрессионными плазменными потоками образцы отжигались в муфельной печи в воздушной атмосфере при температуре 700 °С при различных временах выдержки (t) [2]. Фазовый состав исследовался на основе рентгеноструктурного анализа на дифрактометре Rigaku Ultima IV в медном излучении ($\lambda = 0,154178$ нм) в геометрии Брэгга-Брентано. В экспериментах контролировалось изменение массы образцов, происходящее вследствие насыщения поверхности кислородом. Измерение массы материала осуществлялось на электронных весах с точностью $\pm 0,00001$ г.

Высокотемпературное окисление циркония приводит к увеличению массы образцов (рисунок 1).

На начальном этапе отжига (до 120 минут) наблюдается влияние предварительной плазменной обработки на скорость увеличения массы образца. Так, образцы, обработанные КПП, характеризуются меньшей скоростью увеличения массы, что указывает на более низкую интенсивность диффузии кислорода.

Как известно, воздействие КПП на материалы способствует диспергированию зеренной структуры с повышенной плотностью межзеренных границ, которые, в свою очередь, служат путями ускоренной диффузии кислорода. Однако воздействие КПП, осуществляющееся в атмосфере азота, приводит к формированию приповерхностного слоя нитрида циркония (ZrN), служащего барьером для проникновения кислорода.

Согласно результатам рентгеноструктурного анализа (рисунок 2), при увеличении времени отжига происходит распад нитридной фазы и скорость диффузии кислорода возрастает.

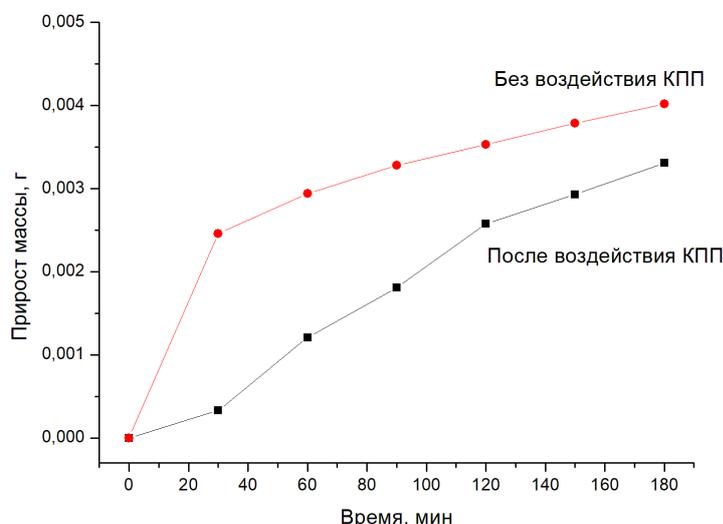


Рисунок 1 – Зависимость прироста массы образцов циркония от времени отжига

Присутствие кислорода в решетке циркония приводит к образованию оксидов, наличие которых было выявлено методом рентгеноструктурного анализа (рисунок 2).

Проникновение кислорода в кристаллическую решетку циркония способствует изменению фазового состава. На начальном этапе окисления, при концентрации кислорода до 30 мас. % [3], происходит формирование твердого раствора α -Zr(O) с трансформированной кристаллической решеткой. Оценка параметров решетки по данным рентгеновской дифракции показала увеличение параметра c от 0,5125 нм до 0,5169 нм (для образца без плазменной обработки), обусловленное образованием твердого раствора по типу внедрения, параметр a при этом не изменяется. Это свидетельствует об изменении гексагональности элементарной ячейки α -Zr, способствующего его трансформации в оксидную фазу при увеличении концентрации кислорода. Действительно, с помощью рентгеноструктурного анализа обнаружено присутствие моноклинной (m -ZrO₂) и орторомбической (o -ZrO₂) модификации оксида циркония в приповерхностном слое.

При максимальном времени отжига (3 часа) на рентгенограмме образца с предварительной плазменной обработкой отсутствуют дифракционные рефлексы, соответствующие фазе α -Zr, в отличие от образца без плазменного воздействия. Это связано с большой толщиной оксидного слоя в образце после обработки КПП.

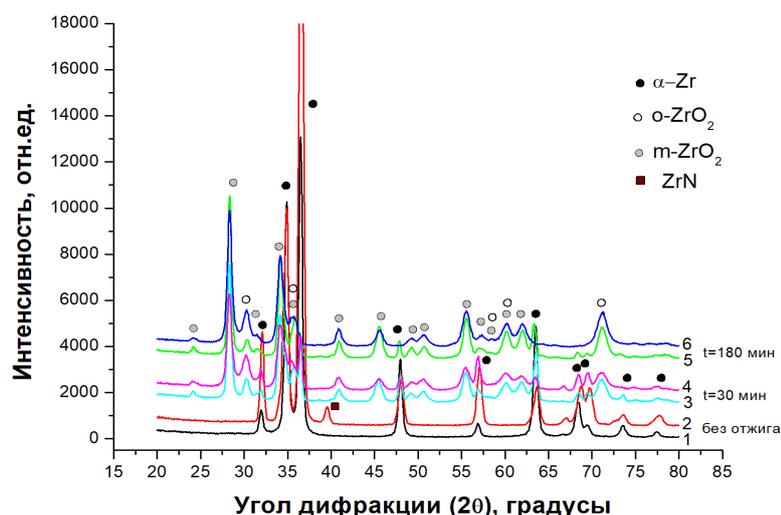


Рисунок 2 – Дифрактограммы циркония после высокотемпературного окисления (1, 3, 5 – без предварительного воздействия КПП; 2, 4, 6 – после воздействия КПП)

Таким образом, было показано, что предварительная обработка циркония плазменными потоками способствует снижению скорости насыщения кислорода приповерхностного слоя при отжиге при температуре 700 °С.

Список литературы

1. Дуглас, Д. Л. Металловедение циркония / Д. Л. Дуглас ; пер. А. С. Займовский. – М. : АтомИздат, 1975. – 340 с.
2. Модификация материалов компрессионными плазменными потоками / В. В. Углов [и др.]. – Минск : БГУ, 2013. – 248 с.
3. Диаграммы состояния двойных металлических систем : справ. : в 3 т. Т. 3. Кн. I / под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М. : Машиностроение, 2001. – 873 с. : ил.

The influence of plasma treatment on the kinetics of high-temperature oxidation of zirconium samples is discussed. The oxide phases formation was revealed by means of X-ray diffraction method. The mass increasing of the samples after annealing was also determined.

Шевелёва Виктория Викторовна, студентка 4 курса Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, vikulya-sheveleva@mail.ru.

Научный руководитель – *Шиманский Виталий Игоревич*, кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, shymanskiv@mail.ru.

УДК 535.36

О. А. ШЕРШНЕВ

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ СИЛ СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПОЛИСТИРОЛОВЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ В БИОЛОГИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛЕ

Приведены результаты теоретических исследований действия сил светового давления на движение полистироловых наночастиц, находящихся в жидкости с диэлектрической проницаемостью, соответствующей биологическому материалу (кровь человека). Получены зависимости компонент сил светового давления, а именно силы рассеяния и градиентной силы от перемещения наночастицы вдоль лазерного луча.

При взаимодействии лазерного излучения с жидкой средой в которой находятся металлические и диэлектрические микро- и наноразмерные частицы, наблюдается эффект направленного движения частиц. На сегодняшний день существует множество работ, посвященных исследованию данного эффекта. Приведем примеры некоторых из них [1–3], в которых теоретически и экспериментально рассматриваются механизмы, которые влияют на эффективность транспортировки микро- и наноразмерных частиц.

Движение частиц в поле лазерного излучения обусловлено воздействием сил светового давления, которую можно разложить на две компоненты: градиентную силу и силу рассеяния. Градиентная сила действует по направлению градиента интенсивности падающего поля, что заставляет частицу смещаться в сторону увеличения или уменьшения интенсивности, в зависимости от ее поляризуемости. Сила рассеяния направлена вдоль распространения электромагнитного излучения. Заметим, что разделение силы светового давления на две компоненты весьма условно, и имеет явный смысл только для достаточно малых частиц (наночастиц) [3].

Полное выражение для силы светового давления можно представить в следующем общем виде [3; 4]:

$$F^{light} = F^{grad} + F^{scat} \quad (1)$$

Известно, что при воздействии интенсивным лазерным излучением на наночастицы, находящиеся в жидкости, происходит разогрев наночастицы и жидкости вокруг нее. И как следствие при изменении температуры меняется вязкость среды, что может оказывать заметное влияние на транспортировку наночастиц. Такой тепловой фактор является весьма интересным в медико-биологических исследованиях. Например, в лечении злокачественных образований – воздействие лазерного излучения определенной мощности на наночастицу находящуюся в биологической среде, приведёт к сильному её разогреву и образованию пузырька высокотемпературной оболочки пара, который способен уничтожить больную клетку [5].

Силы F^{grad} и F^{scat} будем определять по следующим формулам [6; 7]:

$$\begin{aligned}
 F_{scat} &= z \frac{8}{3} \pi \frac{n_m}{c} k_m^4 \alpha^2 I \exp\left(-\frac{z^2}{r_0^2}\right) \\
 F_{grad} &= r 2\pi \frac{n_m}{c} \alpha \left(-\frac{2z}{r_0^2}\right) I \exp\left(-\frac{z^2}{r_0^2}\right) \\
 \alpha &= R^3 \left(\frac{n_p^2 - n_m^2}{n_p^2 + 2n_m^2}\right)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где I – интенсивность излучения, действующего на наночастицу, $k_m = 2\pi n_m/\lambda$ – волновое число, n_m – показатель преломления данной среды, λ – длина волны в вакууме, c – скорость света в вакууме, α – поляризуемость наночастицы, n_p – показатель преломления материала наночастицы, z – положение наночастицы, r_0 – радиус исходного пучка.

Из выражений (2) можно отметить, что градиентная сила пропорциональна объему наночастицы ($\alpha \sim V$), а для силы рассеяния имеет место более сложная зависимость от размера наночастицы: в случае диэлектрических частиц $F^{scat} \sim \alpha^2$, а в случае металлических (поглощающих) наночастиц зависимость выражается квадратичным полиномом от объема частицы. Заметим также, что в случае частиц не малых по сравнению с длиной волны, т. е. для субмикронных и микронных частиц, выражения (2) не применимы. В этом случае необходимо точно решать рассматриваемую задачу [3].

Интенсивность падающего сфокусированного лазерного излучения определяется следующим выражением [8]:

$$I = \frac{I_0}{\left(1 - \frac{z}{f}\right)^2 + \left(\frac{z}{k_m r_0^2}\right)^2}
 \tag{3}$$

где I_0 – исходная интенсивность лазерного излучения, f – фокусное расстояние линзы.

Для численного анализа уравнений (2) и (3) рассмотрим наночастицу ($n_p = 1,57$) радиусом 50 нм, на которую действует излучение лазера ЛТИ-701 работающего на длине волны 532 нм с максимальной мощностью до 4 Вт, шейка лазерного пучка имеет радиус 0,5 мм [9]. И детально рассмотрим случаи расположения наночастицы в жидкости со средней плотностью 1050 кг/м³ (кровь) и диэлектрической проницаемостью 85,5. Фокусное расстояние линзы 0,1 м.

На рисунке 1, показаны зависимости компонент сил светового давления от перемещения наночастиц вдоль лазерного излучения.

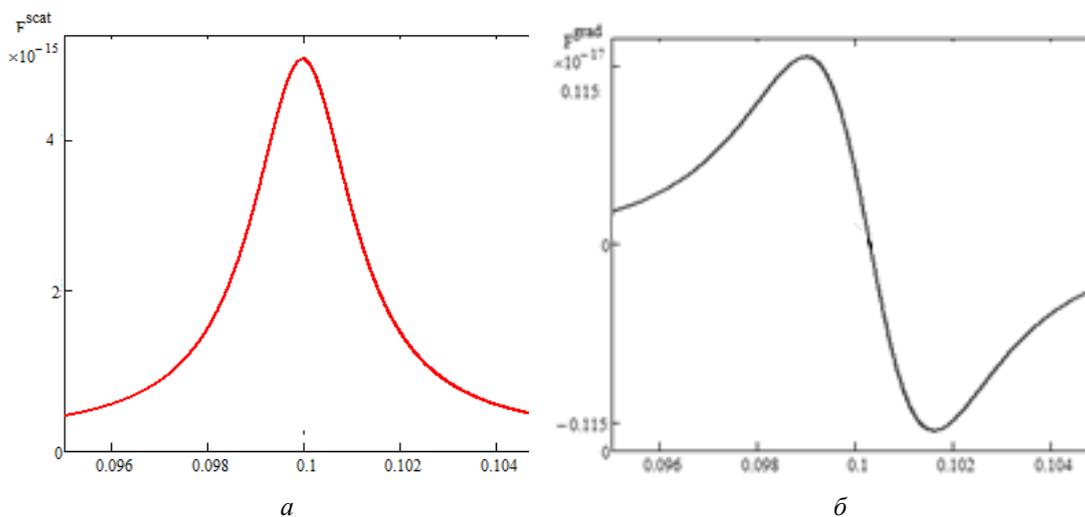


Рисунок 1 – а) зависимость силы рассеяния от перемещения наночастицы, б) зависимость градиентной силы от перемещения наночастицы

Как видно из рисунка 1, основной вклад в перемещения диэлектрической (полистироловой) наночастицы вносит сила рассеяния (*a*). Направление градиентной силы до точки перетяжки лазерного луча совпадает с направлением силы рассеяния, за точкой перетяжки градиентная сила становится противоположно направленной силе рассеяния (рисунок 1б).

Показано, что в лазерном пучке возникают силы, способные приводить в движение наноразмерные частицы, находящиеся в жидких средах. Теоретически построены зависимости компонент сил светового давления от перемещения наночастицы находящейся в биологическом материале.

Результаты работы могут стать основой для дальнейших теоретических и экспериментальных исследований по влиянию радиационных сил лазерного излучения гауссовой формы на диэлектрические наночастицы в жидких средах с различными параметрами.

Список литературы

1. Ashkin, A. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles / A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, S. Chu // Opt. Lett. – 1986. – Vol. 11. – P. 288–290.
2. Ashkin, A. Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams / A. Ashkin, J. M. Dziedzic, T. Yamane // Nature. – 1987. – Vol. 330. – P. 769–771.
3. Гузатов, Д. В. Теоретическое исследование силы светового давления, действующей на сферические наночастицы в поле лазерного излучения / Д. В. Гузатов, Л. С. Гайда // Вестн. БГУ. Сер. 1. – 2010. – № 3. – С. 29–33.
4. Кац, А. В. Радиационная сила, действующая на частицу в электромагнитном поле при произвольном соотношении между размером частицы и длиной волны / А. В. Кац // Изв. вузов : Радифизика. – 1975. – Т. 28, № 4. – С. 566–575.
5. Vapor bubble generation around gold nano-particles and its application to damaging of cells / M. Kitz [et al.] // Biomed. Opt. Express. – 2011. – Vol. 2, № 2. – P. 291–304.
6. О радиационных силах, действующих на прозрачную наночастицу в поле сфокусированного лазерного пучка / А. А. Афанасьев [и др.] // Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45, № 10. – С. 604–607.
7. Транспортировка сферической прозрачной наночастицы радиационными силами в поле гауссова пучка лазерного излучения / А. А. Афанасьев [и др.] // Оптика и спектроскопия. – 2016. – Т. 120, № 1. – С. 53–57.
8. Ахманов, С. А. Физическая оптика / С. А. Ахманов, С. Ю. Никитин. – М. : Наука, 2004. – 654 с.
9. Plasmon-enhanced optical trapping of metal nanoparticles: force calculations and light-driven rotations of nanoaggregates / O. M. Maragò [et al.] // Optical Trapping and Optical Micromanipulation VII, (August 27, 2010).

The paper presents the results of theoretical studies of the effect of light pressure forces on the movement of polystyrene nanoparticles in a fluid with a dielectric constant corresponding to biological material (human blood). The dependences of the components of the light pressure forces, namely, the scattering force and the gradient force, on the movement of the nanoparticle along the laser beam are obtained.

Шершнев Олег Александрович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, riff1996@mail.ru.

Научный руководитель – *Гайда Леонид Станиславович*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры электротехники и электроники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, gls@grsu.by.

УДК 543:621.35

Е. И. ЯКОБЧУК

ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КУМАРИНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ СО СТРУКТУРОЙ БИХРОМОФОРОВ ПРИ КОГЕРЕНТНОЙ НАКАЧКЕ

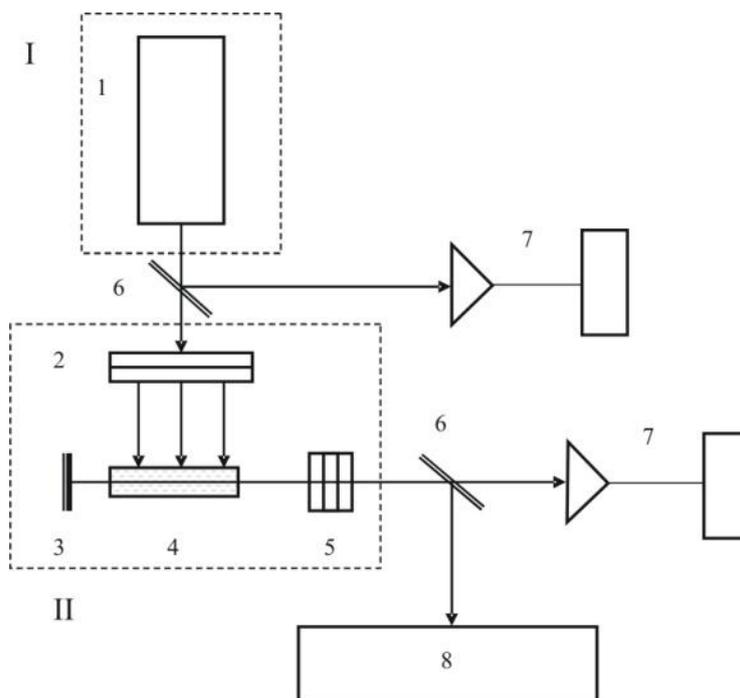
Исследование ряда новых производных кумарина показало, что на их спектрально-люминесцентные характеристики и генерационную эффективность в основном оказывают влияние три фактора: природа заместителей в 6- и 7-м положениях кумаринового ядра, а также заместителей в 3-м положении ядра бензопирилия и типа растворителя.

В настоящее время существует более 60 пирилиевых соединений, на которых получена генерация [1]. Эти соединения характеризуются большим стоксовым сдвигом и обладают достаточно высокой эффективностью

генерации (до 20 %) [2]. Такие соединения позволяют расширить спектральный диапазон работы производных кумарина в красную область спектра [3; 4].

Как известно, большое влияние на спектрально-люминесцентные и генерационные характеристики лазерных красителей оказывает характер сольватной оболочки [5–8]. Эффективность флуоресценции полярных и неполярных растворов красителей существенно зависит от вида аниона [5]. Для солевых форм красителей, в том числе и для солей пирилия, в полярных растворах квантовый выход флуоресценции от вида аниона зависит слабо [6]. В неполярных растворителях наблюдается обратная картина. Кроме того, от типа растворителя зависит положение полос поглощения, флуоресценции и генерации [7]. В [8] установлено, что протондонорные растворители оказывают сильное влияние на спектрально-флуоресцентные и генерационные характеристики производных бензопирана. В нашей работе показано, что закрепление диэтиламиногруппы двумя насыщенными шестичленными циклами приводит к изменению процесса безызлучательной дезактивации электронного возбуждения и сопровождается возрастанием квантового выхода флуоресценции, улучшением генерационных характеристик и ростом фотоустойчивости [8].

Для исследования генерационных характеристик кумариновых красителей, использовалась лазер на красителях (ЛК) с возбуждением электроразрядным эксимерным ХеСl-лазером с энергией 150–200 мДж, длиной волны 308 нм, длительностью импульса 60 нс. Излучение ХеСl-лазера фокусировалось цилиндрической линзой ($f = 10$ см) на кювету размером 10×10 мм. Резонатор ЛК с базой $L = 15$ см был образован зеркалами с коэффициентами отражения $R_1 \approx 100\%$ и $R_2 \approx 30\%$. Измерение энергии генерации ЛК и контроль энергии накачки осуществлялись измерителями ИМО-2Н. Спектр широкополосной генерации регистрировался спектрографом СТЭ-1 со световодной транспортировкой излучения.



1 – эксимерный электроразрядный ХеСl-лазер, 2 – цилиндрическая линза, 3 – глухое зеркало лазера на красителях, 4 – кювета с раствором красителя, 5 – выходное зеркало (стопа) лазера на красителях, 6 – стеклянная поворотная пластинка, 7 – измеритель ИМО-2Н, 8 – дифракционный спектрограф СТЭ-1

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

В работе приводятся результаты исследования генерационных характеристик нового класса кумариновых бензопирановых красителей – производных солей пирилия \ при когерентном возбуждении, отличающихся заместителями в 6-м и 7-м положениях (ОН, C_6H_{13} , $(Et)_2N$). В качестве растворителей использовался этанол и ацетонитрил.

Результаты исследования представлены в таблице 1, в которой приведены названия соединений, их структурные формулы, тип растворителя, длина волны максимума спектра поглощения $\lambda_{\text{ПОГЛ}}^{\text{max}}$ нм, КПД $\eta_{\text{ген}}$ %, и спектральный диапазон генерации $\Delta\lambda_{\text{ген}}$ нм.

Следует отметить, что исследованные соединения при ламповой накачке не генерировали. Это обстоятельство указывает на существенное влияние наведенных потерь и в частности триплет-триплетного поглощения [9].

Исследуемые соединения, по сути, представляют собой бихромофоры на основе солей пирилия и характеризуются значительным (~200 нм) сдвигом спектров поглощения и люминесценции по сравнению с незамещённым 7-диэтиламинокумарином.

Их спектры поглощения представляют собой широкие полосы, содержащие по два максимума, соответствующие поглощению донорного и акцепторного фрагментов молекулы. Усложнению структуры акцептора (ядра бензопирилия) объёмными заместителями – $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{N}$ - (соединение 2), C_6H_{13} - (соединение 5), C_6H_{13} - и OH-группами (соединение 6) – приводит к ещё большему удлинению цепи сопряжения, возрастанию электропроводности и дипольного момента перехода, что отражается на значительном батохромном смещении спектров.

Например, длинноволновый максимум спектра поглощения соединение 2 в этаноле смещается до 660 нм по сравнению с соединением 1.

Анализ спектров электронного поглощения [10] показал, что переходы, соответствующие данному возбуждению, в основном локализованы на хромофоре молекулы и представляют собой перенос заряда с бензопирановой основы на ядро бензоимидазола.

Сравнение спектральных и генерационных характеристик соединений (таблица 1) показывает важную роль заместителей в 6-м и 7-м положениях кумаринового кольца, и в положениях 6 и 7 – ядра бензопирилия. Наличие только электронодонорных заместителей в положении 7 (соединения 1, 4) или только электроноакцепторных заместителей в положении 3 (соединение 3) приводит, фактически, к утрате генерационной способности.

Генерационная способность у данных кумаринов появляется только при наличии в положении 7 сильных электронодонорных заместителей ($(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{N}$ – и OH-группы), а в положении 3 – ядра бензопирилия с достаточно сильными акцепторами электронов – 7-диэтиламино-3-(7-диэтиламинобензопирилий-2)-кумарин перхлорат (соединение 2) и 6-гидрокси-7-гексил-3-(6-гидрокси-7-гексилбензопирилий-2)-кумарин перхлорат (соединение 6). Данные соединения излучают в диапазоне 600–750 нм, при КПД генерации 12–13 % в ацетонитриле и 7–13 % в этаноле соответственно.

Более высокая генерационная способность в ацетонитриле объясняется тем, что он является апротонным полярным растворителем, обладающим несвязывающими неподеленными парами электронов и, следовательно, основными свойствами. Из-за своего специфического взаимодействия с красителем, которое соответствует кислотно-основному взаимодействию по Льюису, он хорошо сольватирует перхлораты [7].

Исследования показали, что квантовый выход флуоресценции донорного фрагмента (7-диэтиламинокумарина) составляет $\eta_{\text{фл}} = 70$ %, а ядра бензопирилия – 10 % указывает на дополнительные каналы дезактивации энергии электронного возбуждения данных бихромофоров.

Как показано [11], в таких молекулах осуществляется эффективный внутримолекулярный перенос энергии, снижающий $\eta_{\text{фл}}$, и приводящий к возникновению короткоживущего Т-Т поглощения, а также наведенного поглощения с большим временем затухания ($\tau \gg 1$ мкс).

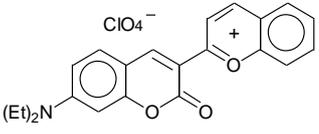
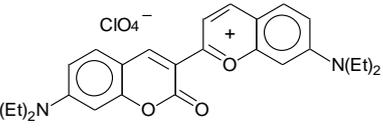
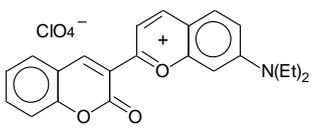
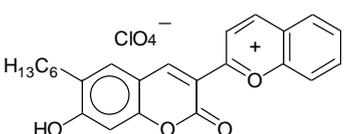
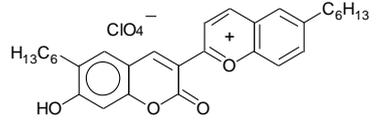
Последнее является, по-видимому, основной причиной отсутствия генерации у соединений 1, 3 и 4, а также при их ламповом возбуждении.

Исследование новых производных бензопирилия показало, что на их спектрально-люминесцентные и генерационные характеристики, в основном, оказывают влияние три фактора: природа заместителей в 6-м и 7-положениях кумаринового цикла, природа заместителей в ядре бензопирилия и тип растворителя.

Генерационная способность у кумаринов данного класса появляется только при наличии в положении 7 сильных электронодонорных заместителей – $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{N}$ - и OH-групп, а в положении 3 – бензопирилия с достаточно сильными акцепторами электронов (C_6H_{13} - и OH-).

Впервые получена генерация на 3-х новых производных кумарина в спектральной области 600–740 нм при максимальном КПД 12–13 % в ацетонитриле.

Таблица 1 – Генерационные характеристики кумариновых красителей – производных бензопирилия при накачке эксимерным XeCl-лазером

№	Соединение	Растворитель	$\lambda_{\text{ПОГЛ}}^{\text{max}}$, нм	$\eta_{\text{ген.}}$ %	$\Delta\lambda_{\text{ген.}}$ нм
1	 <p>7-диэтиламино-3-(бензопирилий-2)-кумарин перхлорат</p>	Этанол Ацетонитрил	420 550 495	порог не генерир.	700–710
2	 <p>7-диэтиламино-3-(7-диэтиламинобензопирилий-2)-кумарин перхлорат</p>	Этанол Ацетонитрил	660 525	13 13	715–730 730–740
3	 <p>3-(7-диэтиламинобензопирилий-2)-кумарин перхлорат</p>	Этанол Ацетонитрил	485 460	не генерир. порог (~1 %)	700
4	 <p>7-гидрокси-6-гексил-3-(бензопирилий-2)-кумарин перхлорат</p>	Этанол Ацетонитрил	520 435	не генерир. порог	700
5	 <p>7-гидрокси-6-гексил-3-(6-гексилбензопирилий-2)-кумарин перхлорат</p>	Этанол Ацетонитрил	405 540 445	порог 0,8	725 608–627

6	<p>6-гидрокси-7-гексил-3-(6-гидрокси-7-гексилбензопирилий-2)-кумарин перхлорат</p>	Этанол	375 500	7	650–670
		Ацетонитрил	400	12	608–630

Список литературы

1. Земский, В. И. Физика и техника импульсных лазеров на красителях / В. И. Земский, Ю. Л. Колесников, И. К. Мешковский. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2005. – 176 с. – (Серия «Выдающиеся ученые ИТМО»).
2. Larouyade, R. Multiple relaxation pathways in photoexcited dimethylaminonitro- and dimethylaminocyno-stilbenes / R. Larouyade, A. Kuhn, J.-F. Letar, W. Rettig // Chem. Phys. Lett. – 1993. – Vol. 208. – P. 48–58.
3. Новые эффективные красители для красной области спектра генерации / В. В. Маслов [и др.] // Квантовая электроника. – 1987. – Т. 14, № 8. – С. 1576–1581.
4. Maslov, V. V. Dual-band lasing of benzopyran dyes in the red region of the spectrum / V. V. Maslov, V. M. Nikitchenko // Journal of Applied Spectroscopy. – 2006. – Vol. 73. – P. 454–457.
5. Drexhage K. H. // Laser focus. – 1973. – Vol. 9, № 3. – P. 35.
6. Каталог активных лазерных сред на основе растворов органических красителей и родственных соединений / под ред. Б. И. Степанова. – Минск : Ин-т физики АН БССР, 1977. – 239 с.
7. Райхарт, К. Растворители и эффекты среды в органической химии : пер. с англ. / К. Райхарт. – М. : Мир, 1991. – 763 с.
8. Маслов, В. В. Влияние растворителя на спектральные и генерационные характеристики лазерных иминокумариновых красителей / В. В. Маслов, М. И. Дзюбенко, В. М. Никитченко // Квантовая электроника. – 1989. – Т. 16, № 4. – С. 709–714.
9. Экспериментальные методы химической кинетики : учеб. пособие / под. ред. Н. М. Эмануэля и М. Г. Кузьмина. – М. : Изд-во МГУ, 1985. – 384 с.
10. Новые эффективные красители для красной области спектра генерации / В. В. Маслов [и др.] // Квантовая электроника. – 1987. – Т. 14, № 8. – С. 1576–1581.
11. Внутримолекулярный перенос энергии в бифлуорофорах на основе кумариновых красителей / М. М. Асимов [и др.] // Оптика и спектроскопия – 1991. – Т. 70, вып. 2. – С. 384–389.

The study of a number of new coumarin derivatives showed that their spectral-luminescent characteristics and generation efficiency are mainly influenced by three factors: the nature of the substituents at the 6th and 7th positions of the coumarin nucleus, as well as the substituents in the 3rd position of the nucleus benzopyrylium and type of solvent.

Якобчук Егор Иванович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, iacobegor70@gmail.com.

Научный руководитель – *Тарковский Викентий Викентьевич*, доцент, кандидат физико-математических наук, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, tarkovsky@grsu.by.

Секция 2

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
В ФИЗИКЕ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 538

А. Ю. АКСЕНОВА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМ
С УЧЁТОМ МЕЖФАЗНОГО ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Выполнено компьютерное моделирование эффективной теплопроводности бинарной композиционной системы (КС) с учетом теплового сопротивления межфазного слоя. Разработана модель и программа. Представлены экспериментальные данные эффективной теплопроводности композитов на основе полиэтилена и полиамида с наполнителем из частиц карбида различной дисперсности.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, эффективная теплопроводность, термическое сопротивление межфазного слоя.

Математическая модель

Температурное поле элементарной ячейки композита описывается стационарным уравнением теплопроводности при граничных условиях первого рода [1]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

Граничные условия:

$$T = T_b, x = 0, L \geq y \geq 0, L \geq z \geq 0;$$

$$T = T_e, x = L, L \geq y \geq 0, L \geq z \geq 0;$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, L \geq x \geq 0, y = 0(L), L \geq z \geq 0;$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0, L \geq x \geq 0, L \geq y \geq 0, z = 0(L).$$

Компьютерная реализация

Математическая модель реализована численным методом релаксаций в виде компьютерного приложения, интерфейс которого представлен на рисунке 1. Модуль генерирования структуры наполнителя в матрице позволяет получить случайное распределение частиц наполнителя в матрице, а также ориентированное вдоль либо поперек теплового потока. Кроме этого, имеется возможность генерирования структуры наполнителя в виде фрактального кластера с определенной фрактальной размерностью [2]. Программа позволяет задавать концентрацию наполнителя, отношение коэффициентов теплопроводности матрицы и наполнителя, учитывать межфазное термическое сопротивление.

Вычислительный и натуральный эксперименты

Эксперименты по определению эффективного коэффициента теплопроводности были выполнены для композитов на основе полиэтилена и полиамида с наполнителем из частиц карбида кремния с размерами 60–50 мкм и 0,9–1 мкм с массовыми концентрациями p_c : 0,5 %, 20 % и 60 %.

Компьютерное моделирование выполнялось для различных концентраций наполнителя и различных конфигурациях его распределения в матрице.

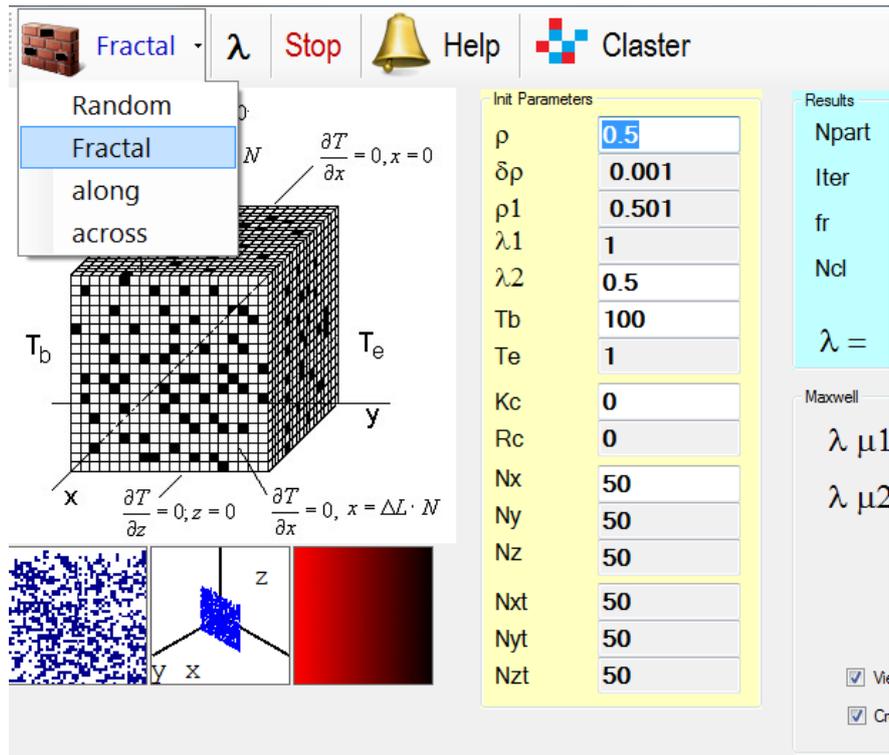


Рисунок 1 – Интерфейс программы «Эффективная теплопроводность композиционной системы»

На основе экспериментов по определению эффективного коэффициента теплопроводности для композитов с матрицами из полиэтилена и полиамида с наполнителем из частиц карбида кремния выполнена оценка межфазного теплового сопротивления.

Теплопроводность аморфных полимеров определяется ковалентной связью между атомами в цепи (высокая теплопроводность) и Ван-Дер-Ваальсовым взаимодействием между цепями (низкая теплопроводность). Поскольку конфигурация цепей имеет стохастический характер, влияние Ван-Дер-Ваальсова взаимодействия является определяющим для теплопроводности. Теплопроводность Ван-Дер-Ваальсовой связи с использованием потенциала Ленард – Джонса для политетрафторэтилена была рассчитана в работе. Диапазон коэффициента теплопроводности для различных межатомных расстояний составил от 0,35 до 0,21 Вт/мК. В этом диапазоне находятся и наши экспериментальные данные. Фактическое увеличение средней теплопроводности КС означает, что для аморфных полимеров в зоне модифицирования в большей или меньшей степени начинает проявляться теплопроводность ковалентной связи. Учитывая, что величина и диапазон ван-Дер-Ваальсовой теплопроводности небольшие, модифицирование приграничного слоя с точки зрения увеличения теплопроводности не является определяющим фактором.

Известно, что даже при идеальном контакте разнородных кристаллов имеет место скачек температуры на их поверхностях. Это связано с тепловым сопротивлением в зоне контакта. Непосредственно размер межфазной области и ее контактное сопротивление определить сложно. В работе [3] приводится порядок этой величины для межфазной границы SiC-Al: $1,46 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ K/W}$. Механизмы переноса энергии при этом фононный и электронный. В нашем случае преобладающий механизм обмена – это фонон-фононное взаимодействие. Тем не менее, воспользуемся этими данными для оценки эффективной теплопроводности в межфазной области. Если толщину межфазной границы принять в диапазоне от 10 до 100 нм, то эквивалентный коэффициент теплопроводности межфазной границы приблизительно будет в диапазоне от 0,6 до 6 Вт/мК. Таким образом, термическое сопротивление фазового контакта также не является определяющим при определении эффективной теплопроводности композита в целом.

Список литературы

1. Experiment and simulation of the effective thermal conductivity of composite systems based on polymers / A. V. Nikitin [и др.] // Веснік Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2019. – Т. 9, № 3. – С. 94–103.

2. Аксенова, А. Ю. Эффективная теплопроводность фрактальных кластеров / А. Ю. Аксенова, Н. А. Старовойтов // Актуальные вопросы физики и техники : материалы VIII респ. науч. конф. студ. и аспирантов. (Гомель, 25 апр. 2019 г.) : в 2 ч. Ч. 1. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2019.

3. Modelling of the thermal conductivity in polymer nanocomposites and the impact of the interface between filler and matrix / R. Kochetov [et al.] // J. Phys. D : Appl. Phys. – 2011. – Vol. 44.

A computer simulation of the effective thermal conductivity of a binary composite system (CS) is performed, taking into account the thermal resistance of the interfacial layer. A model and a program are developed and experimental data on the effective thermal conductivity of composites based on polyethylene and polyamide with a filler of carbide particles of various dispersion are presented.

Аксенова Анастасия Юрьевна, студентка 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, nik.person444@gmail.com.

Научный руководитель – *Никитин Александр Викторович*, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, nik@grsu.by.

УДК 572.08

В. А. АРСЕНОВИЧ

ИЗМЕНЕНИЯ В МЕЖПОЗВОНКОВОМ ДИСКЕ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ПОЗВОНОЧНИКА ИЗ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ

Рассмотрено поведение позвоночного столба при переходе из вертикального положения в горизонтальное. Известно, что при длительной вертикальной нагрузке межпозвоночный диск изменяет свои геометрические размеры: высота межпозвоночного диска уменьшается. Влияние длительной вертикальной нагрузки на позвоночно-двигательный сегмент и изменения, происходящие в нем при этом, анализируются в настоящей работе.

Шейный отдел постоянно испытывает нагрузку, удерживая голову, при этом он отличается большой подвижностью и именно в самых подвижных отделах (С4–С5 и С5–С6) чаще всего и встречаются изменения дисков. Следует отметить, что динамические и статические нагрузки на позвонки и диски исследованы крайне недостаточно и существует ограниченное число публикаций, посвященных этой теме. Основная проблема связана с тем, что получить многие важные параметры, которые позволили бы рассчитать нагрузки, невозможно. Межпозвоночный диск (рисунок 1) ограничен сверху и снизу телами позвонков и гиалиновыми пластинками, через которые осуществляется питание диска. С боковых сторон диск ограничен крайними мембранами фиброзного кольца и продольными связками [1]. Известно, что рост человека в течение суток изменяется на несколько сантиметров. Это возможно только за счет изменения высоты межпозвоночных дисков, поскольку сами позвонки можно считать твердыми упругими телами не меняющих свои геометрические параметры при воздействии механических нагрузок. Учитывая, что число межпозвоночных дисков в теле человека достигает 33–34, можно считать, что высота диска изменяется на миллиметры. Поскольку жидкость, составляющую основу межпозвоночного диска, можно считать несжимаемой, то изменение высоты диска должно приводить к тому, что площади, занимаемые диском в сагиттальной проекции, при изменении геометрии диска должны быть также постоянными. Следовательно, для постоянства площадей связки и мембраны фиброзного кольца должны быть деформированы, что приводит к появлению сил упругости и изменению давления внутри диска. Однако, площади (объемы), занимаемые межпозвоночным диском, в ортостатическом положении как утром, так и вечером в пределах погрешности совпадают, поэтому можно с достаточной степенью точности считать, что в межпозвоночном диске меняется градиент давления в радиальном направлении в течение суток [2].

Расчет изменений в геометрии межпозвоночного диска осуществляется на основе неизменности площади диска в сагиттальной проекции, рассчитываемой по формулам:

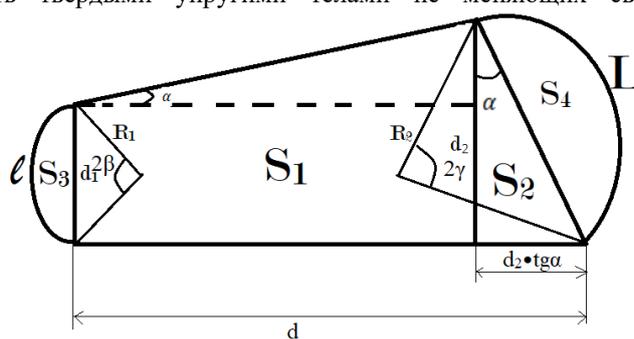


Рисунок 1 – Геометрическое разбиение межпозвоночного диска

$$S_1 = \frac{d_1 + (d_1 + d \cdot \cos \alpha_0)}{2} \cdot d \cdot \cos \alpha_0$$

$$S_2 = \frac{1}{2} \cdot (d - d \cdot \cos \alpha_0) \cdot (d_1 + d \cdot \sin \alpha_0)$$

$$S_3 = \frac{\pi 2\gamma}{180} \cdot R_1^2 - \frac{1}{2} \cdot d_1 \cdot R_1 \cdot \cos \beta$$

$$S_4 = \frac{\pi 2\gamma}{180} \cdot R_2^2 - R_2^2 \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma,$$

где $l = R_1^2 \beta$ – длина задней продольной связки, $L = R_2^2 \beta$ – длина передней продольной связки в вертикальном положении шейного отдела.

Таким образом, из неизменности объемов (площадей в сагиттальной проекции), занимаемых межпозвоночным диском, следует, что должно приводить к изменению длин задней и передней продольных связок и, как следствие, к изменению давления в межпозвоночном диске.

Геометрические параметры наиболее подвижного позвоночно-двигательного сегмента C₄–C₅ в ортостатическом положении, для которого рассчитывалось изменение давления в диске, представлены в таблице.

Таблица – Геометрические размеры позвоночно-двигательного сегмента C₄–C₅ в ортостатическом состоянии

d , мм	d_1 , мм	d_2 , мм	α , °	l , мм	L , мм
20,1	2,9	4,2	2°	4,2	6,1

Список литературы

1. Образцов, И. Ф. Проблемы прочности в биомеханике / И. Ф. Образцов. – М. : Высш. шк., 1988. – 311 с.
2. Zharnov, A. M. Biomechanical processes in the vertebrmotor segment of the cervical department of the backbone at its movement / A. M. Zharnov, O. A. Zharnova // Russian Journal of Biomechanics. – 2014. – Vol. 18, No. 1. – P. 92–103.

The behavior of the spinal column during the transition from vertical to horizontal is considered. It is known that with prolonged vertical load the intervertebral disc changes its geometric dimensions: the height of the intervertebral disc decreases. The effect of a long vertical load on the vertebral-motor segment and the changes occurring in it at the same time are analyzed in this work.

Арсенович Виктория Александровна, студентка 4-го курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, arsenovich308@gmail.com.

Научный руководитель – *Жарнов Александр Михайлович*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, a.zharnow@grsu.by.

УДК 538.91

А. Б. БАЗАРБЕК, Н. Е. САГАТОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОРЯДКА НА УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ФОСФИДОВ ЖЕЛЕЗА С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С использованием квантово-химического моделирования из первых принципов в рамках метода функционала плотности рассмотрено влияние магнитного упорядочения на уравнение состояния $P(V)$ для двух структур фосфида железа Fe_3P при нулевой температуре и давлении вплоть до 200 ГПа. Показано, что поведение функции $P(V)$ зависит от учета магнитного порядка и для каждой структуры влияет по-разному.

В последнее время исследование состава ядра Земли является актуальной темой, имеющей важное значение в понимании процессов, происходящих во внутреннем строении нашей планеты. Данные о составе ядра лишь косвенные, которые получены различными способами. В настоящее время общей точкой зрения мирового научного сообщества является то, что ядро Земли состоит преимущественно из железа и малой доли

никеля. Как показывают геохимические исследования, легкие элементы (такие как водород, кислород, углерод, сера, фосфор и кремний) так же играют важную роль в структуре ядра нашей планеты [1]. Обнаружение фосфидов железа в метеоритах вызывает большой интерес к изучению железа с примесью легкого элемента фосфора, а так же структуры и свойств железо-фосфорных соединений.

Ядро Земли отвечает P - T -параметрам от 136 ГПа и 3800–4200 К до 364 ГПа и 5000–6000 К [2]. В связи с трудностями проведения экспериментальных исследований при таких высоких давлениях и температурах ядра Земли, особую актуальность приобретает компьютерное моделирование при помощи квантово-химических методов для исследования термодинамических, упругих и магнитных свойств фосфидов железа. Расчеты из первых принципов (*ab initio*) помогают решить задачи из первых основополагающих принципов без привлечения дополнительных эмпирических предположений.

В данной статье все расчеты проводились с помощью квантово-химического моделирования из первых принципов в рамках метода функционала плотности – с использованием базиса плоских волн. Моделирование проводилось без учета движения атомов, точнее при нулевой температуре ($T = 0$). Проводились как спин-поляризованные расчеты, так и расчеты без учета магнитного момента. При моделировании фосфида железа Fe_3P были выбраны две структуры разной симметрии: $I-4$ и $Cmcm$. Fe_3P-I-4 – тетрагональная сингония, $Fe_3P-Cmcm$ – структура, имеющая ромбический полиморф [3].

Результаты расчетов уравнения состояния для структур $Fe_3P-Cmcm$ и Fe_3P-I-4 показаны на рис. 1. Сравнение поведения зависимости $P(V)$ для магнитной и немагнитной фаз показывает, что для структуры $Fe_3P-Cmcm$ поведение уравнения состояния крайне слабо зависит от учета магнитного порядка в системе. В то же время, для структуры Fe_3P-I-4 поведение $P(V)$ при относительно низких давлениях, ниже 60 ГПа, сильно отличается для магнитной и немагнитной фаз.

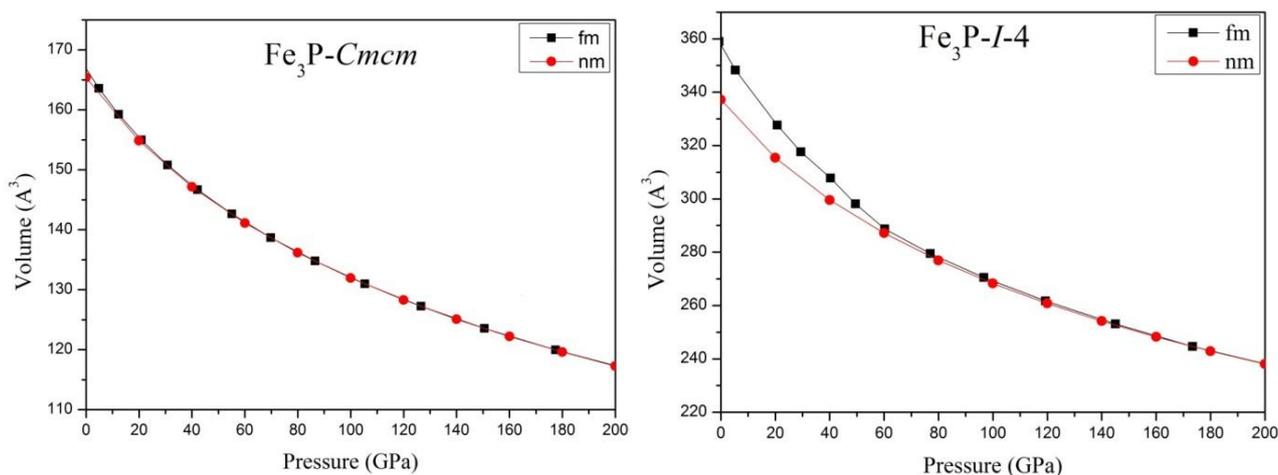


Рисунок 1 – Зависимость объёма (с учётом (fm) и без учёта (nm) магнитного момента) для $Fe_3P-Cmcm$ и Fe_3P-I-4 от давления

Для дополнительного объяснения рисунка 1 рассмотрена зависимость величины магнитного момента атомов железа от давления, которая представлена на рисунке 2. Для структуры Fe_3P-I-4 при относительно низких, ниже 40 ГПа, давлениях, магнитный момент атомов железа в несколько раз больше, чем аналогичная величина для структуры $Fe_3P-Cmcm$. При этом для фазы Fe_3P-I-4 происходит резкое уменьшение величины магнитного момента в диапазоне давлений от 40 до 60 ГПа, что совпадает с диапазоном давлений, где исчезают различия в поведении функций $P(V)$ для магнитной и немагнитной фаз. При давлениях от 60 ГПа и до 140 ГПа значение магнитного момента меняется крайне слабо и составляет примерно $0,4\mu_B$ на атом железа. В случае структуры $Fe_3P-Cmcm$, значение магнитного момента во всем диапазоне рассмотренных давлений меняется в промежутке $0,2-0,3\mu_B$ и учет магнитного упорядочения практически не влияет на поведение уравнения состояния $P(V)$.

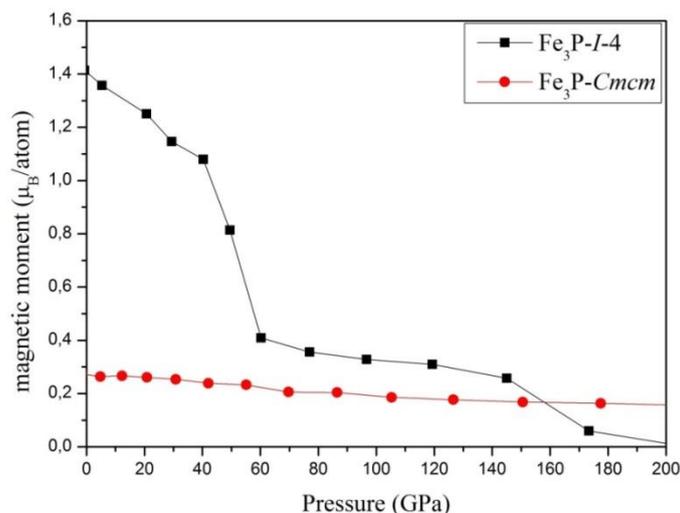


Рисунок 2 – Зависимость магнитного момента от давления для обеих структур фосфида железа Fe_3P

Полученные результаты показали достаточно сильное влияние магнитного упорядочения на поведение уравнение состояния фосфида железа Fe_3P I-4 в области давлений ниже 60 ГПа, где величина магнитного момента атомов железа заметно больше, по сравнению с этой же величиной при более высоких давлениях. Для другой структуры Fe_3P -Cmc влияние магнитного момента на функцию $P(V)$ значительно слабее, что связано со значительно меньшей величиной магнитного момента в данной фазе и ее слабой зависимостью от давления.

Список литературы

1. J. Li and Y. Fei, Experimental constraints on core composition, in The Mantle and Core, R. Carlson, ed., Elsevier, 2003, pp. 521–546.
2. Литасов, К. Д. Современные представления о составе ядра Земли / К. Д. Литасов, А.Ф. Шацкий // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57, № 1. – С. 31–62.
3. Ziyuan Zhao, a Lulu Liu, a Shoutao Zhang, a Tong Yu, a Fei Lia and Guochun Yang. Phase diagram, stability and electronic properties of an Fe–P system under high pressure: a first principles study. Royal society of chemistry Advances, March 2017.

In this article, using quantum chemical modeling from the first principles in the framework of the density functional method, we consider the effect of magnetic ordering on the equation of state $P(V)$ for two structures of iron phosphide Fe_3P at zero temperature and pressure up to 200 GPa. It is shown that the behavior of the $P(V)$ function depends on taking into account the magnetic order and affects each structure differently.

Базарбек Асыл-Дастан Базарбекулы, докторант 2 курса специальности «Техническая физика» Евразийского Национального университета имени Л. Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан, asyl.bazarbek.92@mail.ru.

Сагатов Нурсултан Ерболулы, аспирант Института геологии и минералогии имени В. С. Соболева, Новосибирск, Россия, sagatino23@gmail.com.

Научный руководитель – Инербаев Талгат Муратович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технической физики Евразийского Национального университета имени Л. Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан, talgat.inerbaev@gmail.com.

УДК 669.717:539.21:621.785.6

И. А. БУШКЕВИЧ, Н. Д. МИРОШНИЧЕНКО, М. Н. ПЕШКО

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ФАЗ ПО РАЗМЕРАМ В ОТОЖЖЁННЫХ ФОЛЬГАХ СПЛАВА 1421 СИСТЕМЫ Al–Mg–Li

Количественный анализ интерметаллидных включений в фольгах алюминиевого сплава 1421, отожженных при 380 °С, выполнен методом секущих. Аппроксимация частотных распределений размеров выделений проведена с помощью стандартных статистических методов в математическом пакете OriginPro. Выявлено, что частотные распределения размеров выделений интерметаллидных фаз имеют логнормальный характер.

Алюминиевые сплавы системы Al–Mg, легированные переходными и редкоземельными металлами, обладают уникальным комплексом свойств – высокой прочностью, малой плотностью и хорошей коррозионной стойкостью, которые важны для практических применений в авиакосмической промышленности [1]. Их использование при высоких температурах эксплуатации требует изучения закономерностей выделения интерметаллидных фаз в материалах в процессе термической обработки, поскольку эволюция микроструктуры при отжиге оказывает существенное влияние на свойства сплавов.

В настоящее время нами выполняется исследование эффективности применения технологии высокоскоростной кристаллизации из расплава для синтеза многокомпонентных сплавов системы Al–Mg [2] с целью улучшения физико-механических свойств промышленных деформируемых сплавов. В данной работе представлены результаты применения математических методов анализа и статистической обработки экспериментальных данных распределения выделений вторых фаз по размерам в отожженных быстрозатвердевших (БЗ) фольгах сплава 1421 системы Al–Mg–Li. При этом ставилась задача определить размер выделений и их объемную долю в образцах с помощью электронной микроскопии и метода количественной стереологии.

В работе изучались фольги алюминиевого сплава 1421 (Al-5.5 % Mg-2.2 % Li-0.12 % Zr-0.2 % Sc) (мас. %), полученные сверхбыстрой закалкой из расплава методом одностороннего охлаждения [2]. Скорость охлаждения расплава была порядка 10^6 K/c. Изотермический отжиг фольг был проведен при температуре 380°C в течение 1 ч. БЗ фольги исследовались с помощью метода растровой электронной микроскопии (РЭМ) с использованием рентгеноструктурного микроанализа. Количественный анализ интерметаллидных включений выполнен методом секущих [3] с использованием математического пакета OriginPro.

По результатам анализа РЭМ-изображений поперечного сечения отожженных при 380 °C фольг на рис. 1 построены гистограммы распределения магнийсодержащих выделений и (Sc, Zr)-содержащей фазы по размерам. Для каждого исследованного образца гистограмма всегда содержит максимум. В образцах преобладают выделения магнийсодержащих фаз, объемная доля которых составляет 1.97 %. Выявлено, что кривые частот распределения размеров на рис. 1 а, в демонстрируют отчетливое положительное отклонение от нормального закона и удовлетворительно описываются логнормальными кривыми с достоверностью аппроксимации (R^2) 0.83–0.99, см. табл. 1. Обработка экспериментальных данных размеров выделений с помощью стандартных статистических методов показала, что значение коэффициента вариации CV, характеризующего степень однородности данных, превышает 33 % (случай однородной совокупности). Это указывает на то, что в микроструктуре отожженных фольг наблюдается неравномерность распределения по размерам частиц вторых фаз. Как следует из табл. 1, в качестве характеристики размера выделений в образцах предпочтительно использовать значения $\langle x \rangle$, определенные с помощью моделирования, поскольку в этом случае интервалы погрешности определения среднего размера частиц интерметаллидных фаз методом секущих и с помощью построения функции логнормального распределения перекрываются.

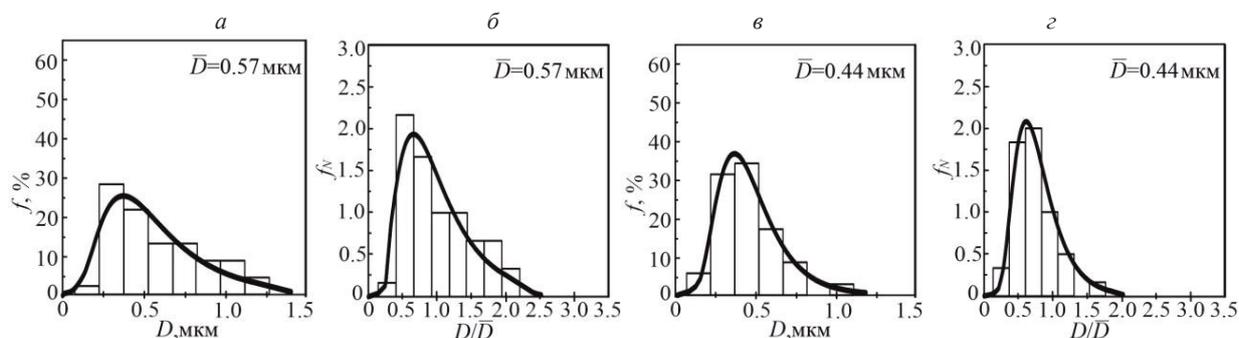


Рисунок 1 – Обработка экспериментальных данных, полученных для фольг сплава 1421, отожжённых при 380 °C, по уравнению логнормального распределения: а, б – распределение по размерам магнийсодержащих фаз, в, з – распределение по размерам (Sc, Zr)-содержащей фазы. В (б), (з) распределение представлено в нормированной форме в зависимости от нормированного размера частиц

Данные распределения частиц интерметаллидных фаз по размерам, представленные в нормированной форме в зависимости от нормированного размера частиц $u = \bar{D}/D$, где \bar{D} – средний диаметр выделений, измеренный методом секущих (табл. 1), показаны на рис. 1б,з. Нормированная амплитуда пиков обозначена как $f_N = f/f(\bar{D})$. Получено, что в области высокотемпературного отжига в фольгах преобладают включения вторых фаз, размер которых на ~25 % меньше среднего размера частиц.

Таблица 1 – Влияние термической обработки на распределение частиц интерметаллидных фаз по размерам в фольгах сплава 1421

Анализ	Метод секущих		OriginPro				
	\bar{D} , мкм	V , %	x_{\max} , мкм	$\langle x \rangle$, мкм	f , %	CV, %	COD (R^2)
Магнийсодержащие фазы							
$T_{\text{отж}} = 380^\circ\text{C}$	0.57 ± 0.06	1.97	0.37 ± 0.03	0.51 ± 0.03	25.27	71.0	0.83
(Sc, Zr)-содержащая фаза							
$T_{\text{отж}} = 380^\circ\text{C}$	0.44 ± 0.04	1.15	0.37 ± 0.03	0.44 ± 0.03	36.7	45.91	0.98

Как известно, благодаря своей наглядности, гистограммы позволяют получить дополнительную информацию об исследуемой величине и являются основой для выбора соответствующего теоретического закона с определенной функцией плотности вероятности $f(x)$. Определение вида закона распределения для исследуемой случайной величины на основе выборочных данных является важной задачей математической статистики. В данной работе хорошее согласие экспериментальных гистограмм и результатов моделирования (рис. 1, табл. 1) указывают на то, что исследуемая случайная величина – размер выделений вторых фаз – распределена по логнормальному закону. Логарифмическое нормальное распределение получается, если в нормальную Гауссову функцию распределения подставить в качестве аргумента логарифм диаметра частиц. В таком случае функция плотности вероятности f имеет вид [4]:

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \ln b)^2}{2\gamma^2}\right), \quad (1)$$

где $\ln b$ и γ^2 – математическое ожидание и дисперсия случайной величины $\ln x$.

Как видно из формулы (1), важной характеристикой большинства дисперсных систем является размер частиц, поскольку большая часть свойств таких систем зависит именно от этого параметра. Данные, представленные в табл. 1 и на рис. 1, демонстрируют, что уравнение логнормального распределения хорошо описывает экспериментальные результаты, полученные при исследовании размера частиц выделений интерметаллидных фаз в БЗ сплавах системы Al–Mg.

Электронно-микроскопические методы исследования являются информативными и простыми методами изучения микроструктуры алюминиевых сплавов. Представленные в данной работе результаты моделирования качественно и количественно демонстрируют хорошее согласие с экспериментальными данными. Для фольг БЗ сплава 1421 получено, что распределение выделений по размерам, измеренным методом случайных секущих, является ассиметричным и подчиняется логнормальному распределению.

Список литературы

1. Mogucheva, A. Microstructure and mechanical properties of an Al-Li-Mg-Sc-Zr alloy subjected to ECAP / A. Mogucheva, R. Kaibyshev // Metals. – 2016. – № 6. – С. 254–268.
2. Изменение структуры и микротвердости быстрозатвердевших фольг алюминиевого сплава 1421 при отжиге / В. Г. Шепелевич [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2019. – № 6. – С. 101–108.
3. Салтыков, С. А. Стереометрическая металлография / С. А. Салтыков. – М. : Металлургия, 1976. – 272 с.
4. Гаврилова, Н. Н. Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов / Н. Н. Гаврилова, В. В. Назаров, О. В. Яровая. – М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012. – 52 с.

The quantitative analysis of intermetallic inclusions in annealed foils of 1421 aluminum alloy has been performed by linear intercept method. Approximation of inclusion size distributions was carried out by means of standard statistical methods using software OriginPro. It is revealed that inclusion size distributions of intermetallic phases are approximated with a lognormal distribution.

Бушкевич Иулиана Алексеевна, студентка 6 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, uyluana@gmail.com.

Мирошниченко Никита Дмитриевич, студент 2 курса Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, nikita.mirosha@gmail.com.

Пешко Максим Николаевич, студент 2 курса Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, maxim.peshko@mail.ru.

Научные руководители – *Шепелевич Василий Григорьевич*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики твердого тела физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, shepelevich@bsu.by.

Ташлыкова-Бушкевич Ия Игоревна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, iya.itb@bsuir.by.

АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ВНУТРИКЛЕТОЧНОЙ ЖИДКОСТИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ БИОИМПЕДАНСНЫМ СПОСОБОМ

Рассмотрен биоимпедансный метод определения состава тела человека, основанный на измерении электрических параметров тела человека при зондировании его низко- и среднечастотными сигналами. На основании экспериментальных данных полного сопротивления биологических объектов определены значения активного сопротивления внутриклеточной жидкости с помощью математического пакета Wolfram Mathematica 10.

Биоимпедансный анализ – это контактный метод измерения электрической проводимости биологических тканей, дающий возможность оценки широкого спектра морфологических и физиологических параметров организма. Импедансом называют полное электрическое сопротивление тканей. Биоимпеданс имеет две составляющие: активное сопротивление (R) и реактивное сопротивление (X_c). Состав тканей человека может быть определен, анализируя активное и реактивное их сопротивление. Активное сопротивление обусловлено наличием жидкости в организме человека (клеточная и внеклеточная), обладающие ионной проводимостью. Реактивное сопротивление обусловлено свойствами клеточной мембраны. В электротехнике реактивное сопротивление имеет две компоненты: емкостную (X_c) и индуктивную (X_L), которая опережает ток на 90° по фазе. Однако в биоимпедансном анализе наличие индуктивной составляющей в биологических тканях под вопросом, поэтому рассматривается лишь емкостная составляющая. Электрический ток в организме может течь двумя путями: через клетки и обгибая их (рисунок 1).

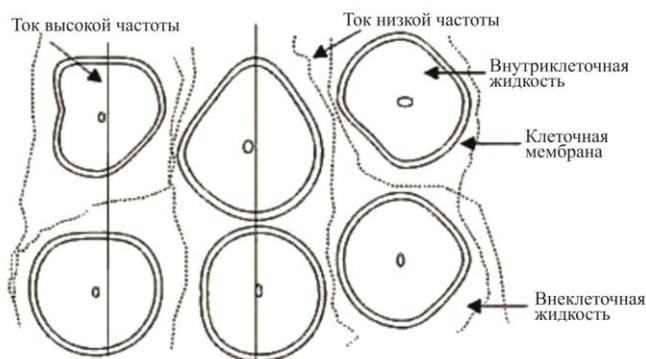


Рисунок 1 – Прохождение электрического тока через объект

В первом случае необходима большая частота тока, чтобы проникнуть в клетку через клеточную мембрану, по своим свойствам они являются конденсаторами, емкость которых зависит от частоты тока.

Удельное сопротивление биологических тканей, определяемое для заданной частоты тока, может существенно изменяться под влиянием физиологических факторов: почки и легкие изменяют электропроводность при различном крове- и воздухонаполнении, мышечные ткани – при различной степени сокращения мышц, кровь и лимфа – при изменении концентрации белков и электролитов, очаги повреждения (по сравнению с нормальной тканью) – в результате отеков или ишемий различной природы, опухолей и других причин. Это позволяет использовать биоимпедансметрию для количественной оценки состояния органов и систем организма при различных заболеваниях, а также для выявления изменений в тканях, вызываемых лекарственными, физическими и другими нагрузками.

Биоимпедансный анализ состава тела заключается в первую очередь в оценке количества жидкости в биообъекте, так как именно жидкая среда создает активную составляющую проводимости. Оценка объема жидкости в организме по импедансу осуществляется с использованием физических и эмпирических моделей (рисунок 2).

В данной схеме $R_{вкж}$, $R_{кж}$ – омическое сопротивление межклеточной и внутриклеточной жидкости, C_m – емкость клеточных мембран. С ростом частоты переменного тока реактивное сопротивление уменьшается, и все большая часть тока проходит внутрь клеток. Используя правило расчета импедансов параллельного и последовательного соединения, получаем:

$$R = \frac{R_e + w^2 C_m^2 R_e R_i (R_e + R_i)}{1 + w^2 C_m^2 (R_e + R_i)^2},$$

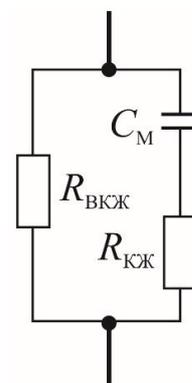


Рисунок 2 – Упрощенная эквивалентная схема биологического объекта

$$X_C = \frac{wC_m R_e^2}{1 + w^2 C_m^2 (R_e + R_i)^2},$$

где R_e – омическое сопротивление межклеточной жидкости, R_i – омическое сопротивление внутриклеточной жидкости, C_m – емкость клеточных мембран, R – активное омическое сопротивление, X_C – реактивное омическое сопротивление, w – частота переменного тока.

На основании данных формул с помощью параметров, полученных в результате биоимпедансометрии (R_e, R, X_C), а также, зная значение частоты переменного тока, можно рассчитать омическое сопротивление внутриклеточной жидкости с помощью математического пакета Wolfram Mathematica 10 (таблица).

Таблица – Активное сопротивление внутриклеточной жидкости у лиц подросткового возраста

Возр.	Рост (см)	Масса (кг)	R_0 (5кГц)	R_0 (50кГц)	X_C	R_i
14	177	58	679	610	66	2810
14	186	70	626	552	70	2168
14	175	63	666	592	75	2291
15	174	61	659	571	74	2232
15	183	73	443	353	74	858
15	183	58	731	662	71	3031
15	168	55	613	538	66	2211
15	174	62	538	455	72	1452
15	177	77	445	369	55	1265

Список литературы

1. Биоимпедансный анализ состава тела человека / Д. В. Николаев [и др.]. – М. : Наука, 2009. – 392 с.
2. Deurenberg, P. Multi-frequency impedance for the prediction of extracellular water and total body water / P. Deurenberg, A. Tagliabue, F. J. M. Schouten // Brit. J. Nutr. – 1995. – Vol. 73. – P. 349–358.

There was considered bioimpedance method of determination of human body composition. There was analyzed the movement of biological tissues' electrical resistance. There was presented the method of the calculation of intracellular fluid's active resistance of biological object. There were reduced the data, obtained as a result of the calculation.

Кирикович Павел Сергеевич, магистрант 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

Научный руководитель – *Жарнов Александр Михайлович*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

УДК 535.375.51

А. А. КОРНИЕНКО, М. Л. ЛАПКО

ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ИНТЕНСИВНОСТИ ПОЛОС ПОГЛОЩЕНИЯ ИОНА ПРАЗЕОДИМА В ИНДИЙ-ФТОРИДНЫХ СТЕКЛАХ

Показано, что из-за сильного влияния возбужденных конфигураций на интенсивности полос поглощения иона празеодима в индий-фторидных стеклах применение стандартной теории для описания экспериментальных результатов противоречиво. Существенное улучшение описания экспериментальных данных получается в модифицированной теории Джадда – Офельта, учитывающей конфигурационное взаимодействие.

Фторидные стекла, активированные ионами празеодима, обладают целым рядом свойств благоприятных для создания лазеров, работающих в диапазонах от красного до зеленого света и усилителей оптоволоконных линий, работающих в инфракрасном диапазоне. К таким свойствам относятся – низкое много фоновое поглощение, большое окно прозрачности от инфракрасного диапазона до ультрафиолетового, возможность больших концентраций редкоземельных ионов. Однако плохая механическая и химическая стабильность ограничивают практическое применение таких стекол. Добавление индия улучшает химические и механические свойства, но усиливает влияние возбужденных конфигураций на спектроскопические характеристики поглощения и излучения. В работе [1] выполнен синтез индий-фторидных стекол состава 40 InF3-20 ZnF2-20 SrF2-20 BaF2 и исследованы экспериментально интенсивности полос поглощения иона

празеодима. В этой же работе показано, что с помощью стандартной теории Джадда – Офельта [2; 3] не удается получить описание экспериментальных результатов с удовлетворительной точностью. В связи с этим в данной работе исследовано влияние конфигурационного взаимодействия на интенсивности полос поглощения.

Обстоятельный обзор современных аспектов теории интенсивностей электрических дипольных переходов, учитывающих влияние возбужденных конфигураций можно найти в работе [4]. Здесь приведем самые необходимые формулы и соотношения. Интенсивности полос пропорциональны вероятности спонтанного излучения, которая выражается через силы осцилляторов переходов $f_{J'}$.

$$A_{J'} = \frac{8\pi^2 e^2 n^2 \sigma^2}{mc} f_{J'},$$

где e – заряд электрона, n – показатель преломления среды, σ – среднее волновое число в см^{-1} , m – масса электрона, c – скорость света.

Обычно из экспериментальных данных по оптическим спектрам определяются безразмерные $f_{J'}$, которые в теории вычисляются через силу линии перехода $S_{J'}$ по формуле

$$f_{J'} = \frac{8\pi^2 mc \sigma}{3(2J+1)he^2} \left[\frac{(n^2+2)^2}{9n} S_{J'}^{ed} + n S_{J'}^{md} \right].$$

Силы линий магнитных дипольных переходов $S_{J'}^{md}$ слабо зависят от локальной симметрии и структуры окружения редкоземельного иона, методы их расчета хорошо известны и не вызывают проблем.

Электрические дипольные $f-f$ переходы запрещены. Частично запрет на них снимается из-за влияния окружения на редкоземельный ион в лазерных материалах. Поэтому теория электрических дипольных переходов достаточно сложная и ниже приведены только самые необходимые формулы, полученные в различных приближениях конфигурационного взаимодействия. Достаточно хорошие результаты можно получить при описании экспериментальных данных в приближении промежуточного конфигурационного взаимодействия [4]

$$S_{J'}^{ed} = e^2 \sum_{k=2,4,6} \underbrace{\Omega_k [1 + 2R_k (E_J + E_{J'} - 2E_f^0)]}_{\Omega_k} \langle \gamma J \| U^k \| \gamma' J' \rangle^2. \quad (1)$$

Здесь R_k – параметры, обусловленные конфигурационным взаимодействием, $\langle \gamma J \| U^k \| \gamma' J' \rangle$ – приведенный матричный элемент единичного тензора U_q^k , Ω_k и R_k – варьируемые параметры. В этом приближении параметры $\hat{\Omega}_k$ зависят по линейному закону от энергии E_J и $E_{J'}$ мультиплетов, включенных в переход.

Если существенное влияние оказывают только возбужденные конфигурации противоположной четности, то из (1) получается более простая формула [4]

$$S_{J'}^{ED} = e^2 \sum_{k=2,4,6} \Omega_k [1 + 2\alpha (E_J + E_{J'} - 2E_f^0)] \langle \gamma J \| U^k \| \gamma' J' \rangle^2, \quad (2)$$

называемая модифицированной теорией Джадда – Офельта.

Сама теория Джадда – Офельта получается из (2), когда влияние возбужденных конфигураций совсем слабое и $\alpha = 0$

$$S_{J'}^{ED} = e^2 \sum_{k=2,4,6} \Omega_k \langle \gamma J \| U^k \| \gamma' J' \rangle^2. \quad (3)$$

Результаты описания экспериментальных сил осцилляторов абсорбционных переходов иона празеодима в индий-фторидном стекле приведены в таблице.

Наилучшее описание получается при учете конфигурационного взаимодействия в модифицированной теории Джадда – Офельта (2). Среднеквадратичное отклонение вычисленных сил осцилляторов от экспериментальных (RMS) на 62 % меньше, чем в стандартной теории Джадда – Офельта (3). Наибольшее разногласие между вычисленным значением в теории Джадда – Офельта и экспериментальным значением наблюдается для перехода ${}^3H_4 \rightarrow {}^3P_2$, так как возбужденные конфигурации сильно действуют на мультиплет 3P_2 , а это влияние в стандартной теории не учитывается.

Переход ${}^3H_4 \rightarrow {}^{2S+1}L_J$	Энергия E, см ⁻¹	$f_{\text{exp}} \times 10^6$	$f_{\text{calc}} \times 10^6$ (3)	$f_{\text{calc}} \times 10^6$ (2)	$f_{\text{calc}} \times 10^6$ (1)
${}^3H_6 + {}^3F_2$	4782	2.94	2.759	2.040	2.884
3F_3	6498	6.62	8.237	6.177	6.386
3F_4	6695	2.03	2.429	4.516	4.480
1G_4	9889	0.256	0.215	0.515	0.510
1D_2	17004	2.04	0.474	2.348	2.304
3P_0	20849	2.48	3.286	2.877	2.861
${}^3P_1 + {}^1I_6$	21670	5.51	4.200	5.497	5.394
3P_2	22635	9.37	1.168	8.296	8.151
Ω_2 (в 10^{-20} см ²)			-12.665	32.292	28.182
Ω_4 (в 10^{-20} см ²)			19.023	13.449	13.558
Ω_6 (в 10^{-20} см ²)			3.535	41.381	40.635
R_2 (в 10^{-4} см ⁻¹)				0.374	
R_4 (в 10^{-4} см ⁻¹)					0.357
R_6 (в 10^{-4} см ⁻¹)					0.348
α (в 10^{-4} см ⁻¹)					0.374
RMS			3.865	1.477	1.985

Список литературы

1. Orange emission in Pr³⁺-doped fluorindate glasses / D. Manzani [et al.] // Proc. SPIE. – 2012. – Vol. 1. – P. 1–9.
2. Judd, B. R. Optical absorption intensities of rare-earth ions / B. R. Judd // Phys. Rev. – 1962. – Vol. 127, № 3. – P. 750–761.
3. Ofelt, G. S. Intensities of crystal spectra of rare-earth ions / G. S. Ofelt // J. Chem. Phys. – 1962. – Vol. 37, № 3. – P. 511–520.
4. Dunina, E. B. Influence of Excited Configurations on the Intensities of Electric Dipole Transitions of Rare Earth Ions / E. B. Dunina, A. A. Kornienko // Optics and Spectroscopy. – 2014. – Vol. 116, № 5. – P. 706–711.

It is shown that, due to the strong influence of the excited configurations on the intensity of the absorption bands of the praseodymium ion in indium fluoride glasses, the use of the standard theory to describe the experimental results is contradictory. A significant improvement in the description of experimental data is obtained in the modified Judd – Ofelt theory, which takes into account configuration interaction.

Корниенко Антон Алексеевич, студент Витебского государственного университета имени П. М. Машерова, Витебск, Беларусь, antonrjmienko2000@mail.ru.

Лапко Максим Леонидович, студент Витебского государственного университета имени П. М. Машерова, Витебск, Беларусь.

Научный руководитель – Дунина Елена Брониславовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных систем и автоматизации производства Витебского государственного университета имени П. М. Машерова, Витебск, Беларусь, L.Dun@mail.ru.

УДК 539.143.5

А. А. КУРАПЦОВА

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕНЕРИРОВАННЫХ СОЛНЕЧНЫМ СВЕТОМ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА И ТОКА В ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ КРЕМНИЙ / НАНОЧАСТИЦА ОКСИДА ТИТАНА

Приводятся результаты моделирования влияния солнечного света на электронно-дырочные процессы в гетероструктуре кремний / наночастица диоксида титана. Моделирование проводилось в среде Comsol Multiphysics. Исследовалось влияние длины волны солнечного излучения на выходной фототок и скорость генерации носителей заряда гетероструктуры p-Si/n-TiO₂-напо.

В настоящее время возрастает интерес к широкозонным полупроводникам, в частности к полупроводниковым оксидам металлов. Диоксид титана (TiO_2) достаточно широко используются в разных устройствах фотовольтаики: в процессах фотокатализа, при фотолизе воды, очистке воздуха и воды от загрязнений, в том числе от тяжелых металлов и органических соединений. Анализ использования диоксида титана в фотокаталитических процессах показывает, что кристаллическая модификация анатаз, является наиболее каталитически активной по сравнению с двумя другими (рутил и брукит) [1]. В тоже время электронные переходы и процессы на поверхности диоксида титана при солнечном облучении, определяющие фотокаталитические свойства, изучены еще недостаточно. Указанные свойства тесным образом связаны с электрическими характеристиками и процессами переноса носителей заряда в используемых в фотокатализе гетероструктурах, таких, например, как диоксид титана-кремний [1; 2]. Еще менее изученными являются процессы в гетероструктурах, содержащих каталитически активные наночастицы в матрице полупроводника, в частности, кремния.

Цель данной работы изучение электронно-дырочных процессов в структуре кремний / наночастица диоксид титана (p-Si/n- TiO_2 -nano).

Моделирование проводилось в программном пакете Comsol Multiphysics на основании модели Андерсона для полупроводниковых гетеропереходов, решения уравнения Пуассона, уравнений непрерывности для электронов и дырок и уравнений Максвелла для электромагнитных волн.

Моделирование проводилось на основании двумерной модели. Геометрия исследуемой структуры представлена на рисунке 1. Высота структуры 1 мкм, ширина 2,5 мкм, высота и ширина частицы диоксида титана 0,5 мкм, температура 300 К. При моделировании использовались параметры кремния и диоксида титана, основные из которых представлены в табл. 1 [3]. Таблично задавались действительная и мнимая части коэффициента преломления материалов [4].

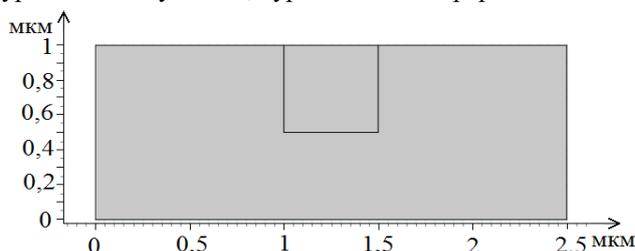


Рисунок 1 – Геометрия структуры кремний / наночастица оксида титана

Таблица 1 – Параметры материалов

	p-Si	n- TiO_2
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,124	3,2
Сродство к электрону, эВ	4,05	4,3
Относительная диэлектрическая проницаемость	11,7	40
Время жизни электронов, мкс	10	0,024
Время жизни дырок, мкс	10	0,0023
Концентрация примеси, $см^{-3}$	10^{18}	10^{16}
Подвижность электронов, $см^2/(В \cdot с)$	1450	4
Подвижность дырок, $см^2/(В \cdot с)$	500	0,1

Мощность излучения $2,5 \cdot 10^{-9}$ Вт, что соответствует плотности мощности солнечного излучения $1 \text{ кВт}/\text{м}^2$. Излучение было направленно перпендикулярно поверхности гетероструктуры. Распределение скорости генерации носителей заряда по структуре для длин волн от 300 до 1000 нм представлено на рисунке 2. Генерация носителей заряда происходит при энергии кванта света достаточной для преодоления запрещенной зоны полупроводника. Для кремния эта энергия соответствует кванту с длиной волны менее 1108 нм, для оксида титана менее 368 нм. При излучении длиной волны 1200 нм генерация носителей заряда во всей структуре не наблюдается.

Как можно видеть из рис. 2, распределение генерированных носителей заряда характеризуется наличием неоднородности, возникает лучеобразное распределение под углом к поверхности. По всей видимости горизонтальные полосы и диагональные лучи от точки выхода на поверхность границы раздела кремний / наночастица диоксида титана вызваны интерференцией при отражении от нижней границы структуры и дифракцией электромагнитных волн.

На графиках распределения концентраций носителей заряда на верхней границе структуры в зависимости от длины волны излучения (рисунок 3) видно увеличение концентрации неосновных носителей заряда по сравнению с концентрацией носителей заряда при отсутствии облучения. При облучении длиной волны 1200 нм концентрация носителей заряда совпадает с концентрации без воздействия излучения.

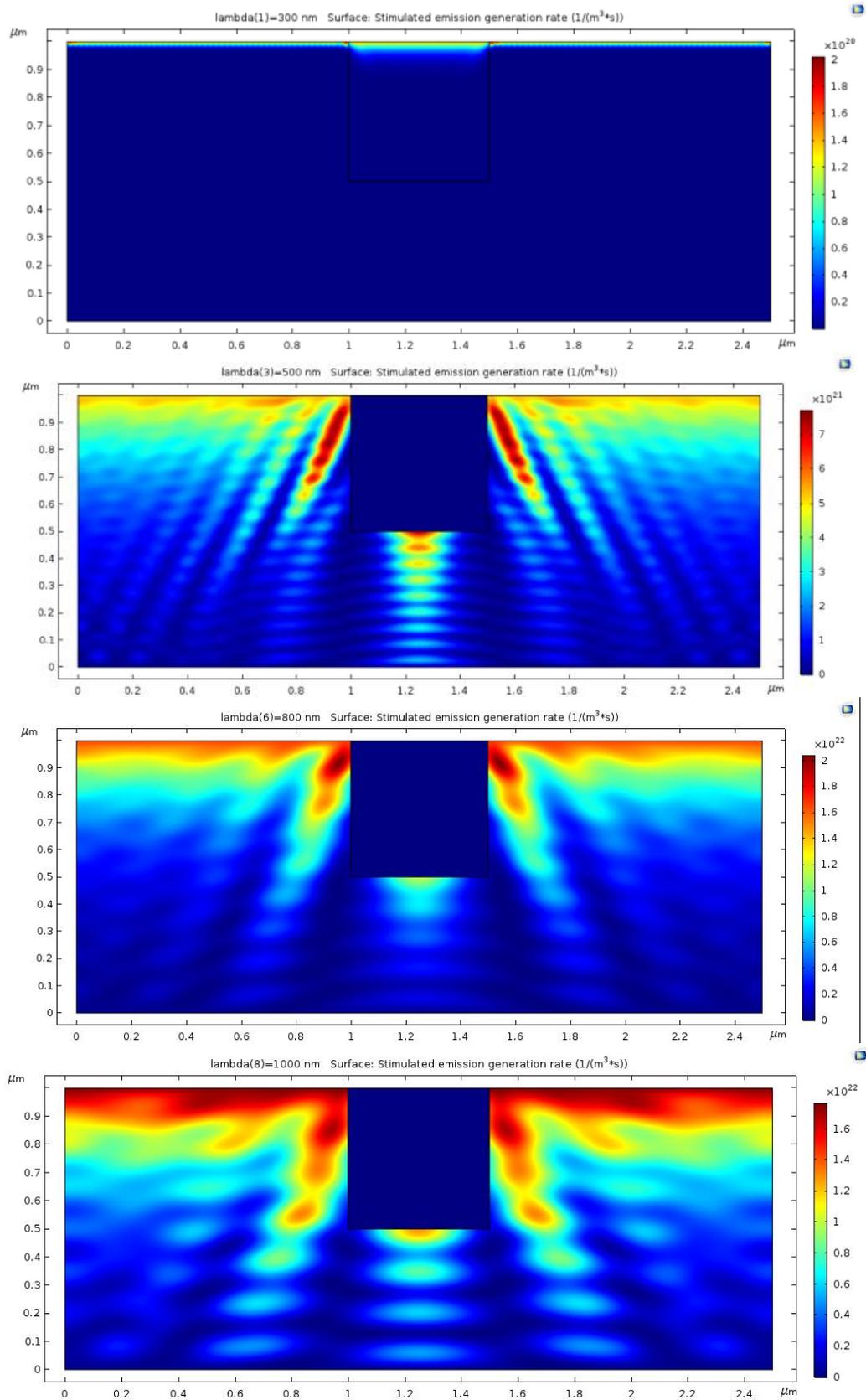


Рисунок 2 – Скорость генерации носителей заряда для длин волн излучения:
а) 300 нм, б) 500 нм, в) 800 нм, г) 1000 нм

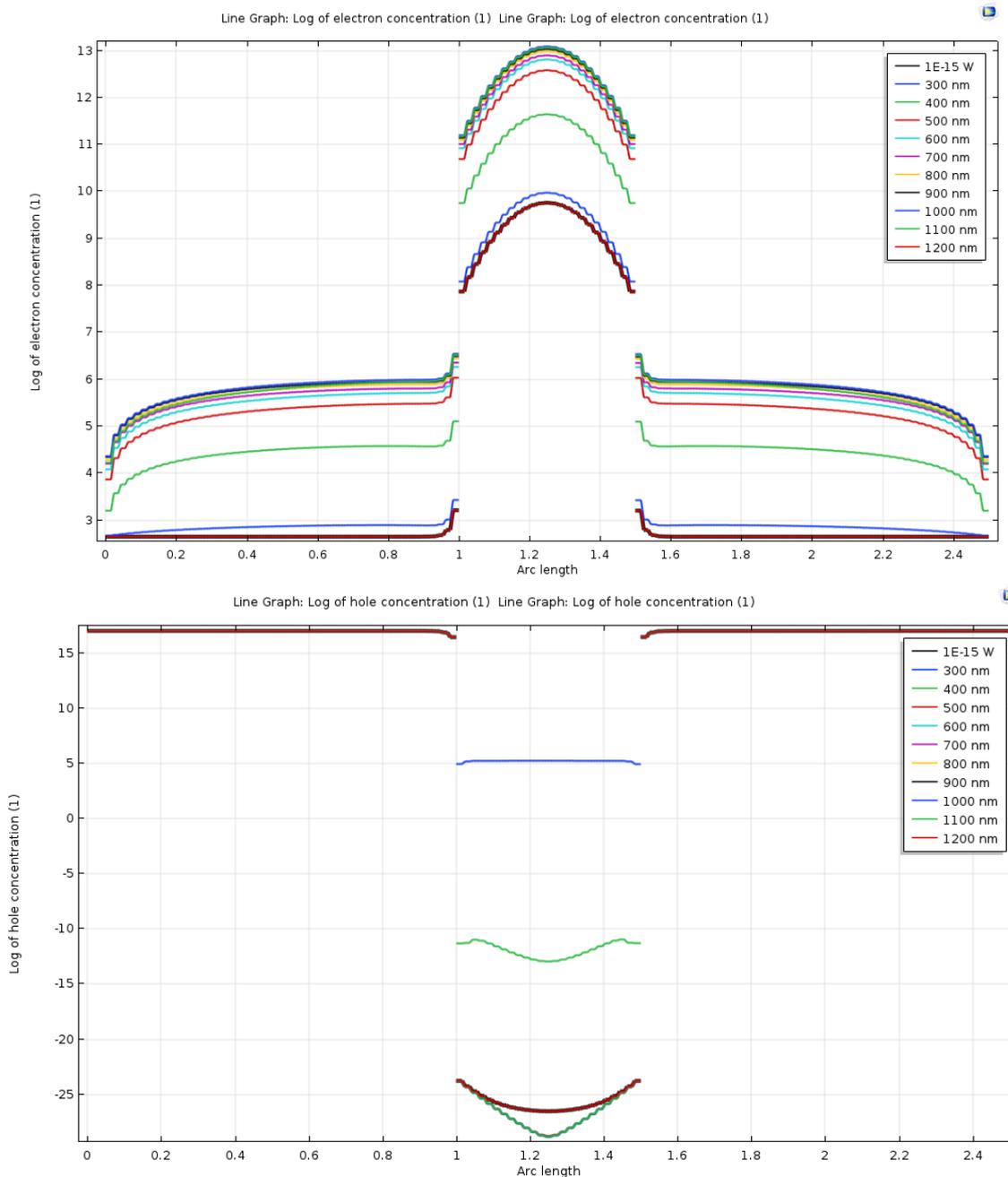


Рисунок 3 – Распределение концентраций (лог. масштаб) носителей заряда на поверхности структуры для разных длин волн излучения: а) электроны, б) дырки

Через границу раздела двух полупроводников протекают токи, зависящие от длины волны падающего излучения. Несмотря на то, что диффузионная и дрейфовая составляющие дырочного тока достигают относительно больших значений, итоговый дырочный ток составляет примерно 10^{-6} А/м². Электроны, сгенерированные в кремнии, дрейфуют в диоксид титана, и плотность тока электронов достигает максимума при длине волны излучения 900 нм (рисунок 4).

Таким образом, при определенных условиях на поверхности наночастиц диоксида титана в кремнии возможно протекание фотокаталитических реакций восстановления при облучении гетероструктуры p-Si/n-TiO₂-папо солнечным светом с длиной волны более 500 нм. При этом на фотокаталитическую активность структуры в основном оказывает влияние генерация зарядов в кремнии. Полученные результаты могут быть использованы для разработки фотокаталитических устройств на основе кремния, содержащего встроенные наночастицы диоксида титана.

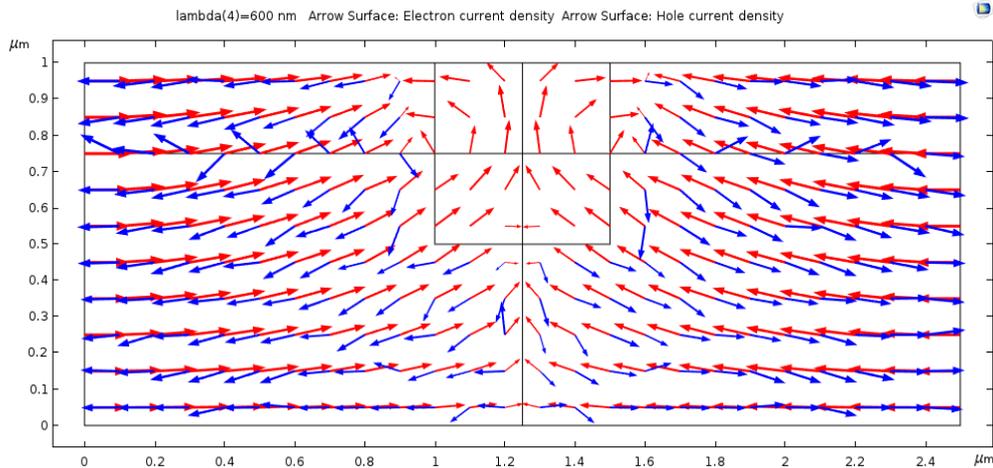


Рисунок 4 – Электронный (красный) и дырочный (синий) токи при длине волны излучения 500 нм

Список литературы

1. Ievlev, V. M. Absorption spectra of thin TiO₂ films synthesized by reactive high-frequency magnetron sputtering of titanium / V. M. Ievlev // *Physics and technology of semiconductors*. – 2014. – Vol. 48, №. 7. – P. 875–884.
2. Bersirova, O. L. Thin films of titanium and tin oxides and semiconductor structures based on them obtained by pyrolytic spraying: fabrication, characterization and corrosion properties / O. L. Bersirov // *Electronic processing of materials*. – 2007.
3. Ola, O. Review of material design and reactor engineering on TiO₂ photocatalysis for CO₂ reduction / O. Ola, M. M. Maroto-Valer // *Journal of Photochemistry and Photobiology. C: Photochemistry Reviews*. – 2014. – Vol. 24. – P. 16–42.
4. Materials pushing the application limits of wire grid polarizers further into the deep ultraviolet spectral / T. Siefke [et al.] // *Advanced Optical Materials*. – 2016.

In this paper the results of modeling the effect of sunlight on electron-hole processes occurring in a silicon / titanium oxide heterostructure are present. The simulation was carried out in the Comsol Multiphysics environment. The effect of the solar radiation wavelength on the output photocurrent and the rate of charge carrier generation of the p-Si / n-TiO₂ heterostructure was studied.

Кураццова Анна Андреевна, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, anku21qwerty@gmail.com.

Научный руководитель – Данилюк Александр Леонидович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, danilyuk@nano-center.org.

УДК 539

А. О. РОМАШКЕВИЧ

ИОННЫЙ ВЕТЕР В УСТРОЙСТВАХ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАМЯГАШЕНИЯ

Изучаются устройства и методы борьбы в локальных точках высоковероятного возгорания. Предложен инновационный бесконтактный метод тушения пламени при помощи электрических полей (эффект академика В. Д. Дудышева). Также показан метод тушения пламени с помощью постоянного магнитного поля.

В настоящее время во всем мире весьма актуальной проблемой является возгорание лесов, домов, предприятий, дорогостоящих объектов нефтегазовой промышленности. В результате уничтожаются объекты материальной сферы и гибнут люди. Ежегодный ущерб исчисляется миллиардами долларов [1].

Пламя сопровождает процесс горения. Существует такой вид взаимодействия между веществами, который называется окисление или окислительная химическая реакция. При этом горючее вещество вступает в реакцию с веществом, которое называют окислителем. Одним из таких веществ-окислителей является газ кислород, который содержится в воздухе. Горение – это реакция окисления горючих материалов, протекающая интенсивно, бурно, с выделением большого количества тепла и света [2]. К сожалению, за последние 300 лет в технике и методике тушения пожаров не произошло принципиально новых изменений. Процедура тушения

сводится к сбиванию пламени при помощи воды и других веществ, к предотвращению поступления кислорода в очаг пламени.

Новые подходы к тушению пламени могут быть основаны на том факте, что с физической точки зрения оно представляет собой одну из разновидностей низкотемпературной плазмы (температура меньше 10^6 К) и всегда содержит некоторое количество свободных электронов и ионов, что подтверждается экспериментально по наличию у него электропроводности [2]. Эти свойства пламени определяют возможность воздействия на него со стороны электромагнитных полей.

Объектом исследования являются устройства, позволяющие бороться с локальными возгораниями при помощи электромагнитных полей. Актуальность работы обусловлена необходимостью создания новых инновационных методов оперативного тушения пламени. Цель работы – исследование перспективных устройств, позволяющих на основе использования электромагнитных полей осуществлять воздействие на открытое пламя, приводящее к его мгновенному тушению без возрастания очага возгорания. Практическая значимость работы обусловлена возможностью разработки автоматизированных противопожарных систем, действующих в небольших замкнутых объемах и локально в больших помещениях в местах наиболее вероятного возникновения пламени.

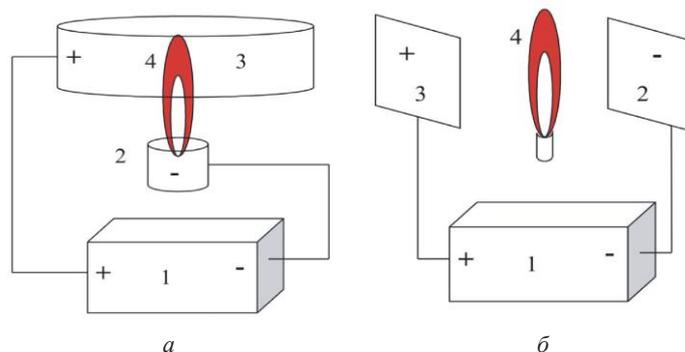
Новый инновационный бесконтактный метод тушения пламени при помощи электрических полей впервые был предложен академиком В. Д. Дудышевым. Метод состоит в воздействии на пламя сильным импульсным электрическим полем с напряженностью 5 кВ/см и выше. В некоторых случаях напряженность поля должна достигать 25 кВ/см [3; 4]. Способ электрического подавления пламени основан на физическом эффекте отклонения электронов и ионов в плазме пламени к одному из разноименных высоковольтных потенциалов внешнего электрического поля [5].

В связи с тем, что в основе процесса горения лежит физика протекания цепных реакций деления заряженных радикалов воспламененных веществ, электрическое поле при тушении пламени создает именно условия для прекращения протекания этих цепных реакций деления частиц горящего топлива [3]. Внешнее электрическое поле с указанной пороговой напряженностью «вытягивает» из зоны протекания цепных реакций (зоны горения) электроны и разноименно электрически заряженные радикалы горящих веществ, содержащиеся в пламени, путем их отклонения и осаждения на специальные высоковольтные жаростойкие электроды, размещенные в зоне горения за пределами пламени и электрически присоединенные к выходам высоковольтного электрического преобразователя напряжения [2–4]. В результате в зоне горения нарушаются условия поддержания цепных реакций дробления радикалов горящих веществ в ядре пламени, поэтому цепные реакции горения веществ затухают или вообще прекращаются. Визуально возникает эффект лавинного срыва пламени, причем при подаче в зону горения электрического потенциала достаточно высокой напряженности электрического поля пламя тухнет, как правило, скачкообразно [2; 4].

Вопросами бесконтактного тушения пламени с помощью электрических полей занимаются не только в Республике Беларусь [6; 7] и России [8; 9], но и в дальнем зарубежье. В частности, можно отметить разработки группы ученых Гарвардского университета под руководством Д. М. Уайтсайда [10]. Однако, несмотря на проводимые исследования, действующие промышленные образцы электрических пламегасителей до сих пор не созданы.

В данной работе показано, что для тушения пламени, кроме электрического, пригодно и магнитное поле. Магнитное поле также способно «вытягивать» из пламени электроны и разноименно электрически заряженные радикалы горящих веществ.

Тушение пламени при помощи электрического поля. Технически устройство для тушения пламени электрически полем может быть реализовано несколькими способами. На рисунке 1 показаны две возможные схемы.



а – схема с кольцевыми электродами, б – схема с плоскими электродами:

1 – источник высокого напряжения, 2 – отрицательный электрод, 3 – положительный электрод, 4 – пламя

Рисунок 1 – Две возможные схемы тушения пламени электрическим полем

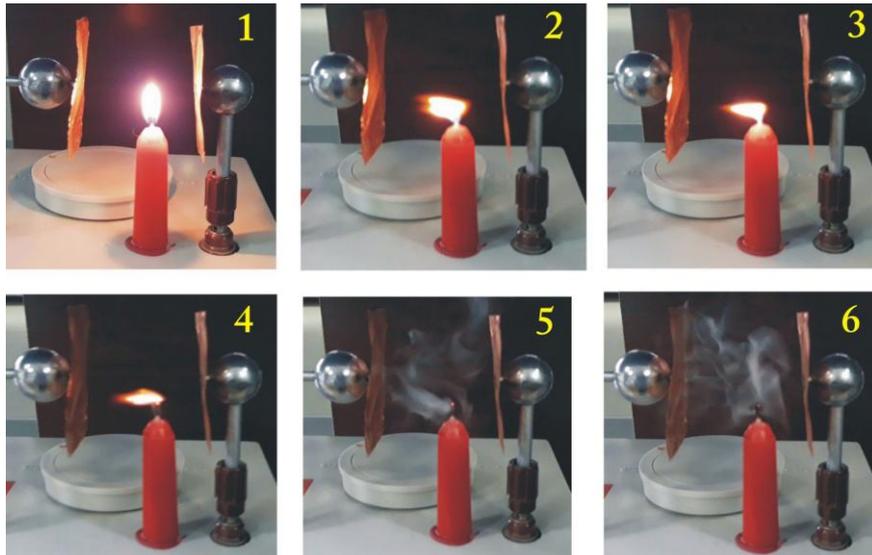
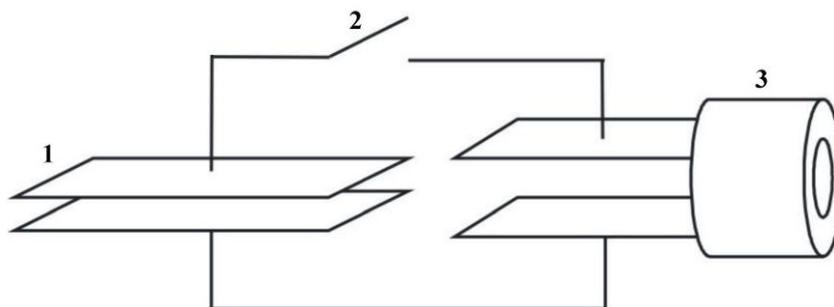


Рисунок 2 – Последовательные фазы процесса по тушению пламени с помощью электрического поля

Нами был проведен эксперимент по бесконтактному тушению пламени с помощью электрического поля с использованием схемы № 2 (рисунок 1). В качестве источника высокого напряжения использовали высоковольтный преобразователь «Разряд-1», обеспечивающий напряжение 25 кВ. Применяли электроды из медной фольги. В качестве источника пламени использовали обычную парафиновую свечку. Площадь электродов должны быть такой, чтобы покрывать размеры пламени. На рисунке 2 показаны последовательные фазы процесса по тушению пламени с помощью электрического поля. Рисунок 2а соответствует ситуации, когда электрическое поле выключено. Положительный электрод расположен справа, отрицательный – слева.

Как видно из рисунка 2, во всех случаях при включении электрического поля (2–6) пламя отклонялось в сторону отрицательного электрода и через несколько секунд гасло. Напряженность электрического поля составляла около 5 кВ/см [11].

Тушение пламени при помощи магнитного поля. Представляются два возможных метода тушения пламени указанным способом. Во-первых, использование импульсного магнитного поля. Его можно получить при разряде конденсатора на одновитковый соленоид (рисунок 3). При этом можно создать сверхсильное магнитное поле в пределах 100–400 Тл. Внутренний диаметр и длина используемых катушек обычно не превышают 1 см. Индуктивность их мала (единицы нГн), поэтому для генерации в них сверхсильных полей требуются токи мегаамперного уровня. Их получают с помощью высоковольтных (10–40 кВ) конденсаторных батарей с низкой собственной индуктивностью и запасаемой энергией от десятков до сотен килоджоулей. Источник пламени находится внутри соленоида.

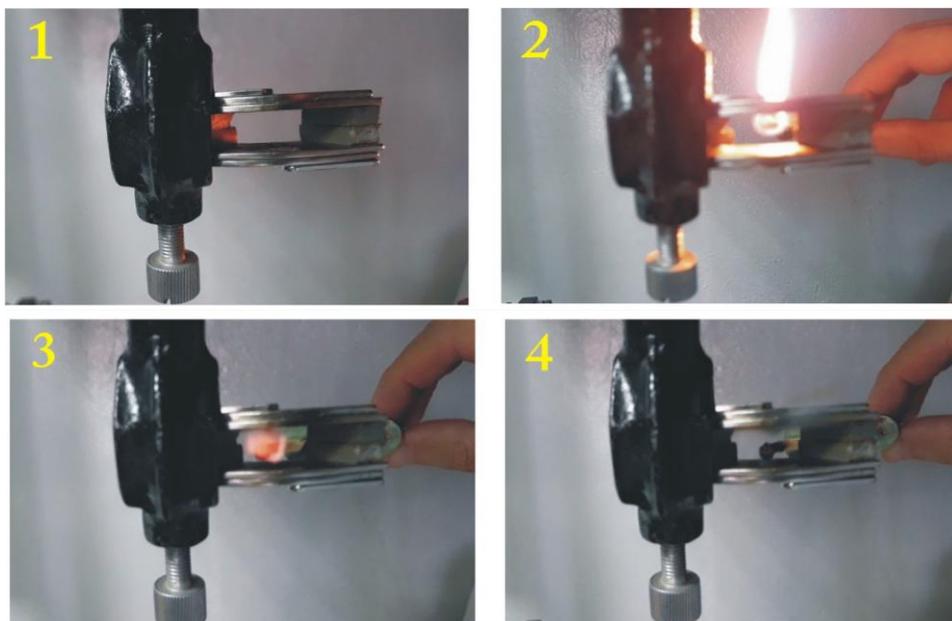


1 – высоковольтный конденсатор, 2 – коммутатор, 3 – соленоид

Рисунок 3 – Схема устройства для тушения пламени с помощью импульсного магнитного поля

Второй способ основан на использовании постоянных магнитных полей. Сильное постоянное магнитное поле можно получить с помощью неодимовых магнитов. Оптимальным является SmCo_5 (спеченный) неодимовый магнит ($B = 0,8\text{--}1,1$ Тл; $H = 600\text{--}2000$ А/м; $T_K = 720$ °С).

Нами был проведен эксперимент по бесконтактному тушению пламени с помощью магнитного поля с использованием набора неодимовых магнитов. На рисунке 4 показаны последовательные фазы этого процесса [12].



1 – набор неодимовых магнитов, 2–4 – последовательные фазы процесса тушения

Рисунок 4 – Тушение пламени с помощью постоянного магнитного поля

В результате проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Тушение пламени при помощи электрического поля является эффективным методом борьбы с возгораниями.
2. Тушение пламени возможно с помощью постоянного и импульсного магнитного поля.
3. Эффективность данного метода зависит от скорости срабатывания системы пожаротушения. Скорость срабатывания должна быть высокой, поэтому система должна включаться от сигнала ИК-датчика. Если пламя успело разгореться, то такой метод перестает быть эффективным. После выключения системы из-за высокой температуры в очаге пламя вспыхнет вновь.

Предложенный метод может использоваться только в небольших замкнутых объемах, например, отсек двигателя, или локально в больших помещениях в местах наиболее вероятного возникновения пламени и не годится для борьбы с крупными пожарами по причине, указанной в п. 3.

Список литературы

1. Брушлинский, Н. Н. Международная пожарная статистика Международной ассоциации пожарноспасательных служб / Н. Н. Брушлинский, С. В. Соколов // Вестн. Воронеж. ин-та ГПС МЧС России. – 2016. – Т. 18, вып. 1. – С. 72–104.
2. Инновационное техническое решение бесконтактного управления процессами горения / Н. А. Кропотова [и др.] // Профессионал года 2017 : сб. ст. III междунар. науч.-практ. конкурса, Пенза, 25 окт. 2017 г. / под общ. ред. Г. Ю. Гуляева. – Пенза : Наука и просвещение, 2017. – С. 20–25.
3. Дудышев, В. Д. Новая электрическая технология бесконтактного тушения пламени и предотвращения его возгорания / В. Д. Дудышев // Новые технологии. – 2002. – № 9. – С. 171–173.
4. Способ тушения пламени : а. с. 1621234 СССР, МПК6 E21C35/197 / В. Д. Дудышев. – № a1552844, заявл. 12.03.1988 ; опубл. 03.10.1990. Бюл. № 3.
5. Фарадей, М. История свечи / М. Фарадей ; пер. с англ. ; под ред. Б. В. Новожилова. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-матем. лит., 1980. – 128 с.
6. Харкевич, И. В. Новая электрическая технология бесконтактного тушения пожара / И. В. Харкевич // Актуальные проблемы энергетики : материалы 70-й науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Минск, апр. 2014 г. / Бел. нац. техн. ун-т ; комп. дизайн Т. Е. Жуковской. – Минск : БНТУ, 2014. – С. 301–304.
7. Авдашкова, М. В. Тушение пламени с помощью электричества / М. В. Авдашкова, П. В. Астахов // Актуальные вопросы физики и техники : материалы Респ. науч.-практ. конф. курсантов, студентов, магистрантов и адъюнктов, Гомель, 14 марта 2013 г. / М-во по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь, Гомел. инженер. ин-т МЧС Респ. Беларусь / науч. ред. П. В. Астахов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2013. – С. 4–5.

8. Сальва, А. М. Возможность применения электромагнитного метода тушения пожаров в Якутии / А. М. Сальва, Е. Г. Кардашевская, Н. П. Жиркова // Национальная безопасность и стратегическое планирование. – 2014. – Т. 6, № 2. – С. 107–109.

9. Исследование влияния электромагнитного поля высокой напряженности на пламя / Ф. Ш. Хафизов [и др.] // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – Вып. 2 (104). – С. 105–110.

10. Мамонтов, Д. Как потушить огонь... молнией [Электронный ресурс] / Д. Мамонтов // Популярная механика. – Режим доступа: <https://www.pormech.ru/science/14568-grom-i-molniya-protiv-ognya/#part0>. – Дата доступа: 10.04.2019.

11. Бесконтактное тушение пламени при помощи электрического поля / В. В. Тарковский [и др.] // Интегрированные системы безопасности: теория практика инновации : сб. материалов III междунар. заоч. науч.-практ. конф., Минск, 29 мая 2018 г. / Ун-т гражданской защиты МЧС Республики Беларусь ; под общ. ред. И. Ю. Иванов. – Минск : УГЗ МЧС Респ. Беларусь, 2018. – С. 16–19.

12. Бесконтактное тушение пламени при помощи магнитного поля / В. В. Тарковский [и др.] // Пожарная аварийно-спасательная техника и оборудование для ликвидации чрезвычайных ситуаций : сб. материалов IV Междунар. заочной науч.-практ. конф., Минск, 28 апр. 2018 г. / Ун-т гражданской защиты МЧС Республики Беларусь ; под общ. ред. И. И. Полевода. – Минск : УГЗ МЧС Респ. Беларусь, 2018. – С. 86–88.

Devices and methods of struggle in local points of high probability of fire are studied. An innovative non- contact method for extinguishing a flame using electric fields (the effect of academician V. D. Dudyshev). A method of extinguishing a flame using a constant magnetic field is also shown.

Ромашкевич Андрей Олегович, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, newromand@gmail.com.

Научный руководитель – *Тарковский Викентий Викентьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, зам. декана физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, tarkovsky@grsu.by.

УДК 004.942

К. А. САКОВИЧ

ПРИНЦИП РАБОТЫ «НЕЧЕСТНОГО РАНДОМА»

Продемонстрирован алгоритм «честного рандома», а также рассмотрен алгоритм «нечестного рандома» при использовании его в рейтинге голосования.

Было решено наглядно продемонстрировать алгоритм «честного рандома». Для этого был разработан сайт, на котором можно выбрать одну из двух фотографий. А сразу после этого появлялась другая пара фотографий и так до бесконечности. А суть заключается в рейтинге: кто набрал больше всего «кликов» (баллов), тот и победил. На рисунке 1 представлен вид главной страницы, на которой происходит голосование.

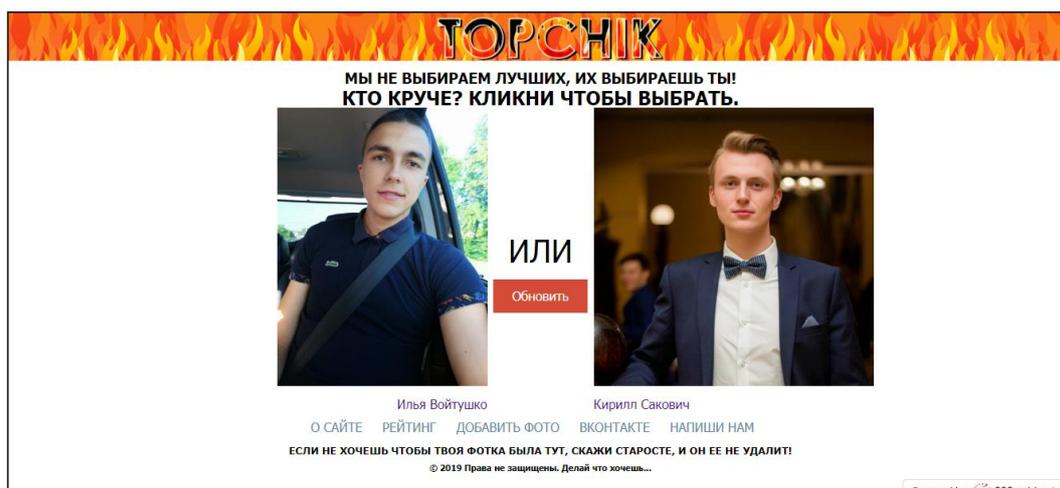


Рисунок 1 – Главная страница голосования

Чаще всего при реализации проверки вероятности берется стандартная функция (например «rand()», «random()» или «math.random()», в зависимости от языка программирования), после чего получаются 2 случайных числа. Затем можно вывести на экран две фотографии, соответствующие этим числам. Но устроит ли такой вариант? Ведь при этом одну из фотографий смогут просмотреть пользователи уже 150 раз, а другую всего лишь 15.

Необходимо использовать вместо «честного рандома» нечестный, который заставит шанс отображения фотографии вести себя именно так, чтобы была справедливость. А именно, не должно быть большой разбежки между просмотрами каждой из фотографий, так как, чем больше просмотров фотографии, тем больше будет вероятность клика на нее, что в свою очередь добавит очков в итоговый рейтинг, а просмотры должны быть примерно одинаковыми. Что и решает данный алгоритм, который представлен на рисунке 2.

```

23 $result = mysqli_query($connection,"SELECT id FROM img ORDER BY view ASC LIMIT 5");
24 $input = array();
25
26 while ($row = mysqli_fetch_assoc($result)) {
27     array_push($input, $row["id"]);
28 }
29
30 $rand_keys = array_rand($input, 2);
31 $id=$input[$rand_keys[0]];
32 $id1=$input[$rand_keys[1]];

```

Рисунок 2 – Фрагмент кода «нечестного рандома»

Первоначально существует таблица mysql, в которой есть столбцы: id, images, name, vkid, rating и view.

В 23 строке кода мы подключаемся к базе данных и извлекаем из таблицы под названием «img» первые 5 «id», а именно по критерию «view» (просмотры) в порядке возрастания. Далее заносим все полученные данные в массив, и уже из этого массива выбираем два случайных числа, к тому же не повторяющихся. Эти числа и есть наши «id», они нужны для отображения фотографии, и для поднятия рейтинга. На рисунке 3 представлена база данных.

id	image	name	vkid	rating	view
0	https://sun9-7.userapi.com/c855628/v855628201/6e38...	Кирилл Сакович	https://vk.com/sokal1717	130	14
1	https://sun9-62.userapi.com/c857728/v857728727/e23...	Евгений Туревич	https://vk.com/evgeniy_fing	90	14
2	https://sun9-43.userapi.com/c626322/v626322755/121...	Vitali Zaborovski	https://vk.com/omgheisunnamed	80	14
3	https://sun9-10.userapi.com/c840434/v840434758/7f6...	Yri Turnevskiy	https://vk.com/id168447613	60	14
4	https://sun9-31.userapi.com/c852220/v852220937/5df...	Егор Дятчик	https://vk.com/urgant_gucci	30	14
5	https://sun9-61.userapi.com/c854416/v854416942/149...	Игорь Цюка	https://vk.com/cybersn0w	30	14
6	https://sun9-17.userapi.com/c850428/v850428140/1b0...	Дмитрий Новицкий	https://vk.com/id443149364	70	14
9	https://sun9-11.userapi.com/c824604/v824604572/15f...	Паша Башкевич	https://vk.com/id165884998	90	14
10	https://sun9-7.userapi.com/c856036/v856036812/1818...	Алексей Скребец	https://vk.com/fidotip	60	14
11	https://sun9-46.userapi.com/c855420/v855420766/13e...	Денис Клышевич	https://vk.com/id156204388	70	14
22	https://sun4-11.userapi.com/c824204/v824204375/171...	Лёша Головач	https://vk.com/lgolovach98	30	14
7	https://sun9-20.userapi.com/c854420/v854420437/c63...	Антон Медведкин	https://vk.com/id170724512	60	13
8	https://vk.com/images/camera_200.png?ava=1	Максим Ступакевич	https://vk.com/ttzae	50	13
12	https://sun9-51.userapi.com/c633227/v633227311/246...	Кирилл Макачук	https://vk.com/krill_makarchuk	60	13
13	https://vk.com/images/camera_200.png?ava=1	Женя Иодель	https://vk.com/id229386645	70	13

Рисунок 3 – База данных

После введения этого «нечестного рандома», просмотры фотографий примерно равны, что в принципе никого не обижает, т. к. в любой момент одну фотографию посмотрят больше раз, а другую меньше, и спустя

несколько кликов, все станет наоборот. Что и требовалось доказать, что «нечестный рандом» намного лучше честного, т. к. это справедливо и никого не обижает. На рисунке 4 продемонстрирован рейтинг, за который мы и боремся.

ТОРСНИК РЕЙТИНГ			
ТОП 5 ТОП 10 ТОП 25 ТОП 50 ТОП 100			
Место	Фото	Имя	Баллы
		Кирилл Сакович	130 баллов
		Евгений Туревич	120 баллов

Рисунок 4 – Страница «Рейтинг» с выводом результатов

Список литературы

1. Ложь во спасение: чем плох «честный рандом» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dtf.ru/gamedev/5652-lozh-vo-spasenie-chem-ploh-chestnyu-random>. – Дата доступа: 05.12.2019.
2. Функции PHP – rand() [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.php.ru/rand/>. – Дата доступа: 05.12.2019.

In this paper, the algorithm of «honest randomness» was demonstrated, and the algorithm of «dishonest randomness» when used in the voting rating was also considered.

Сакович Кирилл Александрович, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь,

Научный руководитель – *Садовская Ольга Иосифовна*, старший преподаватель кафедры информационных систем и технологий Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, ign_olga@mail.ru.

УДК 37.016:53

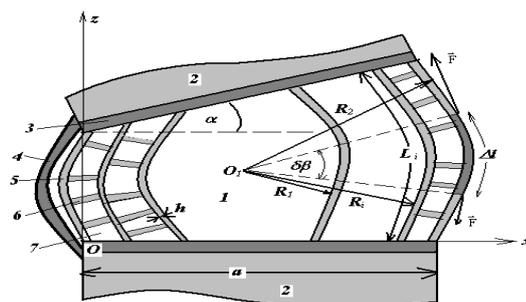
А. В. ЧЕКЕЛЬ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИФфуЗИОННОГО ПОТОКА ЖИДКОСТИ В МЕЖПОЗВОНКОВОМ ДИСКЕ

Для анализа процессов, происходящих в межпозвонковых дисках, необходимо рассмотреть строение позвонково-двигательного сегмента (рисунок 1). Сегмент представляет собой два позвонка (2), которые связаны передней и задней упругими продольными связками (4), между которыми заключен межпозвонковый диск, состоящий из пульпозного ядра (1) и фиброзного кольца. Фиброзное кольцо – это набор из 10–12 мембран (5), в него так же входят эластичные волокна, восстанавливающие форму диска после движения (6). Пространство между слоями заполнено фиброзной тканью (7).

Движение позвонков ограничено связками, поведение которых не определено как для ортостатического положения, так и при движении в любой плоскости. Увеличение длины связок приводит к возрастанию давления внутри межпозвонкового диска, что влияет на массообменные процессы между самим диском и питающей средой, а также деформации замыкательных пластинок тел позвонков.

Деформирование замыкательных пластинок и тел позвонков, а также питание межпозвонкового диска возможны только при градиенте давления между диском и телами позвонков.



1 – пульпозное ядро, 2 – тела смежных позвонков, 3 – замыкательная пластинка, 4 – продольная связка, 5 – мембрана, 6 – эластические волокна, 7 – фиброзная ткань

Рисунок 1 – Двумерная модель позвонково-двигательного сегмента в сагиттальной плоскости

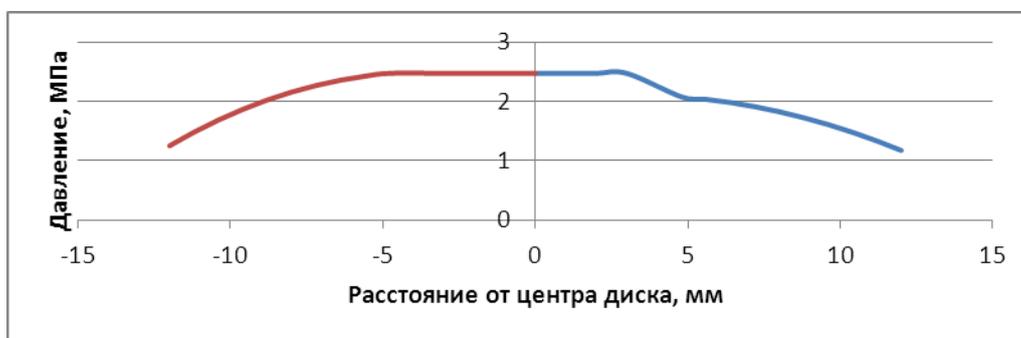


Рисунок 2 – Радиальное распределение давления в диске

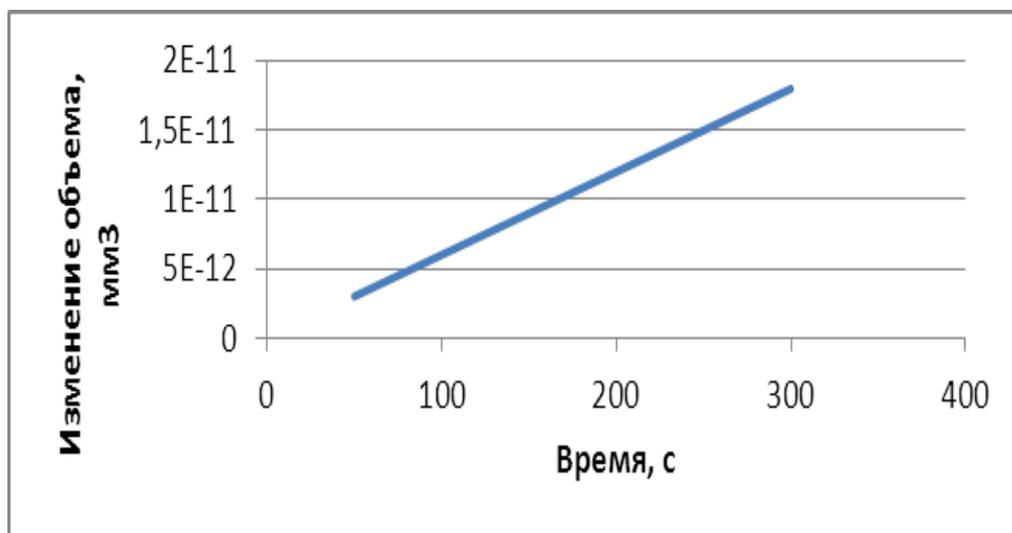


Рисунок 3 – Изменение объёма диска с течением времени

Расчет давлений проводился исходя из равенства объемов диска и возникновению давления в следствии удлинению связок. Изменение объема проводилось при постоянной скорости оттока вещества из диска через поверхность диска вызванной избыточным давлением внутри диска.

В квазистатическом состоянии уравнение импульса для каждой из жидких фаз (вода и растворенные вещества) в пористой среде определяется следующим образом:

$$-\rho^\alpha \nabla \tilde{\mu}^\alpha + \sum_{\beta} f_{\alpha\beta} (v^\beta - v^\alpha) = 0 \quad (\text{для } \alpha = \text{твёрдая фаза}),$$

где ρ^α – плотность массы, $\tilde{\mu}^\alpha$ – электрохимическая потенциал (на единицу массы), а v^α – скорость жидкости (растворитель или растворенная) фаза α , $f_{\alpha\beta}$ – коэффициент сопротивления (на единицу объема смеси) между α и β фазами, где $f_{\alpha\beta} = f_{\beta\alpha}$ и $f_{\alpha\alpha} \equiv 0$, если $\alpha = \beta$. В формуле (1) суммирование проводится для β по всем фазам (включая твёрдую фазу). Для растворенных веществ массовая плотность (ρ^α) связана с молярным весом растворенного вещества (M^α) и концентрация растворенного вещества (c^α , в молях на единицу объема растворителя)

$$D^\alpha = RT \phi^w c^\alpha / d_\alpha.$$

Собственная диффузионная способность растворенного вещества не зависит от электрического заряда. Для системы состоящей из растворенного вещества α и воды, конвективная скорость $v_c^\alpha = f_{\alpha w} v^w / f_{\alpha w} = v^w$ и коэффициент диффузии (D_o^α в растворе, при $\phi^w = 1$) сводится к

$$D_o^\alpha = RT c^\alpha / (f_{\alpha w})_o$$

где $(f_{\alpha w})_o$ – коэффициент сопротивления между растворенным веществом и водой. Получившееся уравнение является уравнением Стокса – Эйнштейна. Скорости растворителя и растворенного вещества, а также их соответствующие конвективные скорости зависят от точки зрения. Кажется естественным выбрать относительный поток растворенного вещества (относительно твёрдой фазы), чтобы описать перенос растворенного вещества. В этом исследовании мы используем относительный поток молярного растворенного вещества (J^α), определенный как

$$J^\alpha = \phi^w c^\alpha (v_c^\alpha - v^s)$$

где v^s – скорость твёрдой фазы. Относительный поток растворенного вещества может быть выражен как

$$J^\alpha = \phi^w c^\alpha (v_c^\alpha - v^s) - D^\alpha \rho^\alpha \nabla \tilde{\mu}^\alpha / RT.$$

Список литературы

1. Жарнов, А. М. Биомеханические процессы в позвоночно-двигательном сегменте шейного отдела позвоночника при его движении / А. М. Жарнов, О. А. Жарнова // Российский журнал биомеханики. – 2014. – Т. 18, № 1. – С. 105–118.
2. Yao, H. Convection and diffusion in charged hydrated soft tissues: a mixture theory approach / H. Yao, W. Y. Gu // Biomechanics and Modeling in Mechanobiology. – 2007. – Vol. 6. – P. 63–72.

Чекель Артём Владимирович, магистрант 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, a.chekel@mail.ru.

Научный руководитель – *Жарнов Александр Михайлович*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, a.zharnow@grsu.by.

УДК 533.9.924:621.793.18

В. В. ШЕКЕЛЕВСКИЙ

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ИОННОГО ТОКА В МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

Представлен алгоритм определения плотности ионного тока в магнетронной распылительной системе исходя из расчета электрического и магнитного полей методом конечных элементов и даны рекомендации по определению профиля зоны эрозии мишени, опираясь на проведенные расчеты.

Современная промышленность в производстве изделий микро-, нано- и оптоэлектроники при нанесении тонкопленочных покрытий чаще всего использует магнетронное распыление. Несмотря на распространенность метода, в настоящее время является актуальной разработка методик определения равномерности формируемого покрытия исходя из количественной оценки эффектов и процессов магнетронного распыления и конденсации на подложке.

Магнетронное распылительное устройство состоит из электрической, магнитной, охлаждающей, газораспределительной систем. Система электродов нужна для создания разности потенциалов, магнитная – для создания магнитной ловушки, охлаждающая – для предотвращения перегрева магнитной системы и других элементов конструкции, газораспределительная – для подачи рабочего вещества в разрядной зоне.

В магнитной системе силовые линии магнитного поля замыкаются между полюсами над поверхностью мишени, где создается магнитная ловушка аркообразной формы. Наличие замкнутого магнитного поля над поверхностью мишени позволяет локализовать плазму непосредственно у мишени, ионы которой распыляют мишень [1].

Магнитная ловушка создает неравномерность распределения ионизированных атомов рабочего газа из-за изменения траекторий электронов движущихся от катода к аноду. Ионизированные атомы распыляют мишень и знание распределения плотности ионного тока в объеме над поверхностью мишени позволяет с большой точностью определить профиль распыления мишени и в дальнейшем рассчитать неравномерность осаждаемого покрытия на подложке, что является основным результатом работы данной системы.

Распределение плотности ионного тока определяется следующим выражением:

$$j_i(r) = \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} n_e(r, z) v_i(r, z) dz \quad (1)$$

где n_e – концентрация ионизирующих электронов, m^{-3} ; z_{\min} и z_{\max} – минимальная и максимальная граница плазмообразования по высоте, м; v_i – частота ионизации, которая определяется функцией распределения электронов по энергиям:

$$v_i = n_a \sigma_i \langle v_e \rangle \quad (2)$$

где n_a – концентрация атомов или молекул рабочего газа, m^{-3} ; σ_i – сечение ионизации при столкновении электронов с атомами, m^2 ; $\langle v_e \rangle$ – средняя скорость электронов, м/с [2].

Для зависимости сечения ионизации различных газов от энергии электронов имеется ряд полуэмпирических законов.

Скорость электронов можно представить в виде двух составляющих: движения параллельно электрическому полю и перпендикулярно магнитному и электрическому. В связи с тем, что основной вклад в ионизацию определяется электронами движущимися в магнитной ловушке, первой составляющей можно пренебречь. Также расчеты показывают, что величина этой составляющей на порядки меньше второй. Поперечная составляющая определяется формулой:

$$v = \frac{\vec{E}_y \times \vec{B}_x}{B^2} \quad (3)$$

где \vec{E}_y и \vec{B}_x – вертикальная и горизонтальная компоненты векторов напряженности электрического и индукции магнитного полей.

Ионизация рабочего газа в основном происходит в области скрещенных полей, где вектор магнитной индукции практически перпендикулярен вектору напряженности электрического поля и индукция магнитного поля имеет величину не ниже определенного значения.

Для расчета верхней и нижней границ зоны ионизации атомов рабочего газа необходимо установить их критерии существования. Нижняя граница зоны ионизации определяется толщиной зоны катодного падения потенциала (темного катодного пространства (ТКП)). В стационарном режиме работы магнетронной распылительной системы около катода образуется слой положительного пространственного заряда, на котором падает большая часть разрядного напряжения. В ТКП происходит разгон электронов. Ионизация происходит за пределами катодного слоя, в плазме отрицательного свечения. Толщину ТКП s можно оценить исходя из соотношения [3]:

$$s^2 = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \left(\frac{2e}{M} \right)^{1/2} \frac{V_{dc}^{3/2}}{J_i} \quad (4)$$

где J_i – локальная плотность ионного тока, А/см²; m_i – масса иона, кг; ε_0 – электрическая проницаемость вакуума, Кл/В·м; V_{dc} – напряжение разряда, В.

Верхняя граница определяется исходя из ларморовского радиуса. Для электронов он зависит от их скорости и индукции магнитного поля. При определенных скоростях и индукциях магнитного поля ларморовский радиус принимает такое значение, что электрон может покинуть ловушку и не вернуться в нее.

На рисунке 1 показан расчет распределения электрического потенциала и индукции магнитного поля для круглого магнетрона диаметром 80 мм при напряжении на катоде 600 В, а на аноде положительное смещение 20 В в программном комплексе Comsol Multiphysics. Для нахождения распределения средней скорости электронов воспользуемся формулой 3. Таким образом можно получить матрицу значений поперечной составляющей скорости электронов и построить ее распределение на определенном расстоянии над поверхностью мишени. Результаты расчета представлены на рисунке 2.

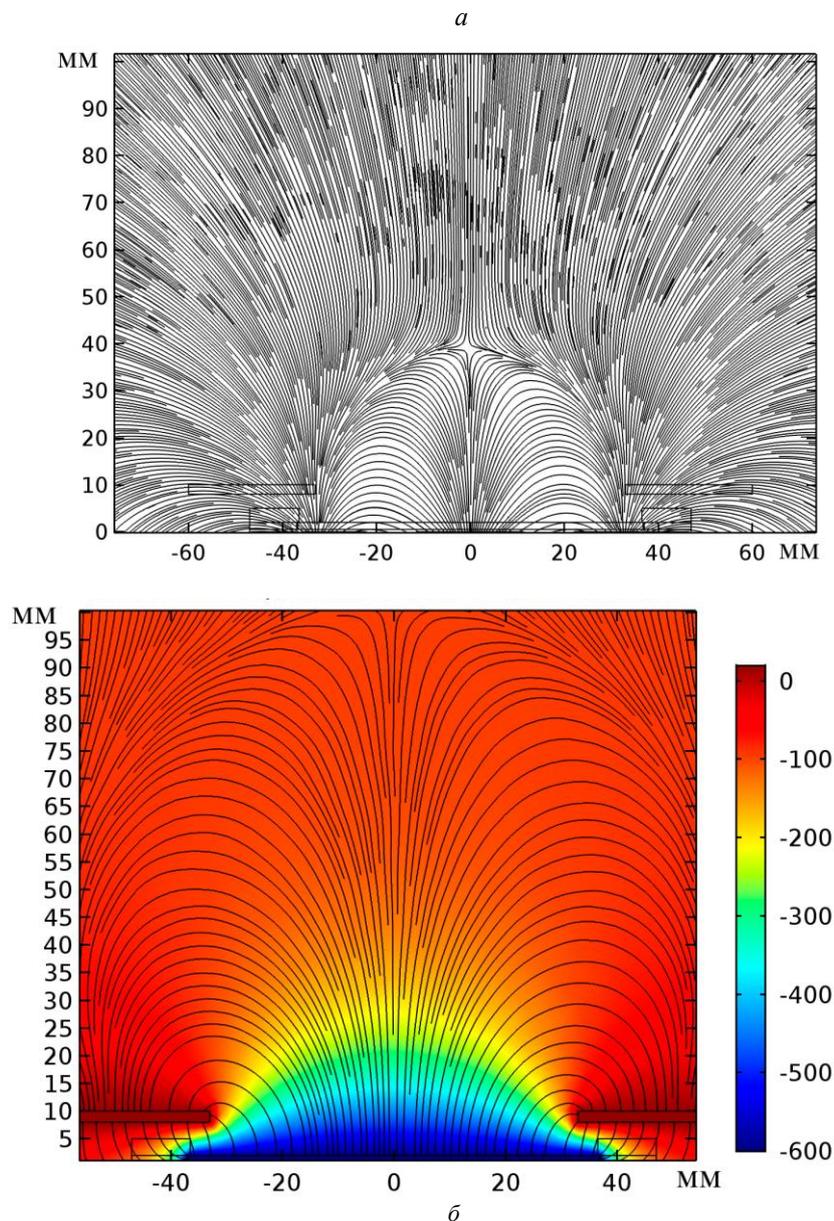


Рисунок 1 – Визуализация результатов расчёта распределения индукции магнитного поля (а) и электрического потенциала (б) в программе Comsol Multiphysics

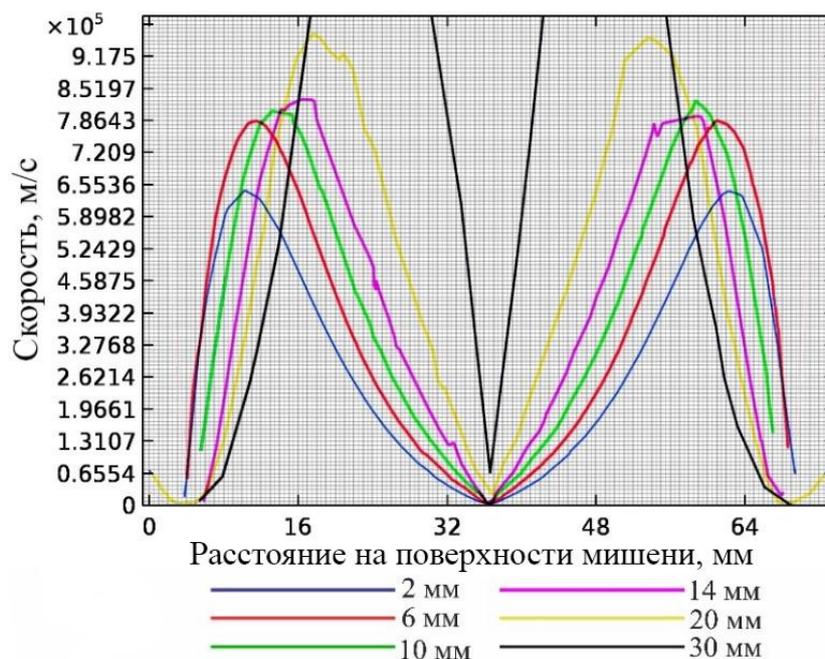


Рисунок 2 – Профили распределения скоростей электронов на разном расстоянии от поверхности мишени

Из рисунка 2 видно, что профиль распределения скорости электронов изменяется с увеличением расстояния от поверхности мишени. Скорость электронов увеличивается, а максимум сдвигается к центру мишени. При расстояниях больше 20 мм от поверхности мишени скорость электронов в максимуме достигает 10^6 м/с. При таких скоростях ларморовский радиус становится больше 2 мм и электроны начинают покидать магнитную ловушку из этой области. Т. е. в данном примере верхней границей области плазмообразования будет примерно 20 мм.

Далее используя полученные профили по формуле 2 рассчитывается частота ионизации, рассчитывается область ТКП и полученные результаты подставляются в уравнение 1.

Таким образом показан алгоритм определения профиля плотности ионного тока в магнетронной распылительной системе с помощью численных расчетов методом конечных элементов. Полученный профиль плотности ионного тока можно использовать для расчета профиля зоны эрозии и, используя законы распределения распыляемых атомов, можно получить распределение потока распыленных частиц на подложке.

Список литературы

1. Данилин, Б. С. Магнетронные распылительные системы / Б. С. Данилин, В. К. Сырчин. – М. : Радио и связь. – 1982. – 72 с.
2. Голосов Д. А., Мельников С. Н., Кундас С. П., Достанко А. П. // Проблемы физики, математики и техники. – 2010. – Т. 2, № 3. – С. 62–67.
3. Lieberman, A. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing / A. Lieberman, J. Lichtenberg. – John Wiley & Sons, Inc. 2-ed. – 2005. – 757 p.

An algorithm for calculating the ion current density profile in a magnetron sputtering system was shown. Using this algorithm, it is possible to calculate the profile of the erosion zone of the target and the nonuniformity of the deposited coating on the substrate.

Шекелевский Вадим Владимирович, магистрант 1 курса факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, ivadim2703@gmail.com.

Научный руководитель – *Котов Дмитрий Анатольевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, kotov@bsuir.by.

Секция 3

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 544.35:543.257

А. П. АНДРУКЕВИЧ

ОЦЕНИВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ pH

Разработана методика оценивания неопределённости pH при приготовлении стандартных образцов pH.

Водородный показатель, pH, – мера кислотности водных растворов, ассоциированная с концентрацией ионов водорода, что в сильно разбавленных растворах эквивалентно активности ионов водорода в растворе.

Шкала pH является логарифмической и обратной (более низкий pH указывает на более высокую концентрацию ионов водорода). Это связано с тем, что формула, используемая для расчета pH, аппроксимирует отрицательный от основания 10 логарифм молярной концентрации ионов водорода в растворе. Точнее, pH – это отрицательный от основания 10 логарифм активности ионов водорода.

$$pH = -\lg[H^+], \text{ где } [H^+] \text{ – концентрация ионов водорода}$$

Точное измерение и регулирование pH необходимо в различных областях химии, биологии, медицины, наук о материалах, технологии, агрохимии.

Наиболее точно pH измеряют pH-метрами. Совершенствование методов метрологического контроля (поверки и калибровки) средств измерений pH (с применением стандартных образцов – СО) является важной и актуальной задачей [1].

Как известно, калибровка pH метров и электродов выполняется с помощью калибровочных растворов pH, также называемых буферами pH. Использование высококачественного буфера для калибровки вашего измерителя перед каждым использованием – это единственный проверенный способ всякий раз получать самые точные результаты. Функционирование электродов основано на наклоне и смещении (уравнение Нернста).

В соответствии с принципами надлежащей лабораторной практики, калибровка выполняется, по крайней мере, с двумя стандартными буферными растворами, которые охватывают диапазон измеряемых значений pH. Для общих целей подходят буферы с pH 4,00 и pH 10,00. Измеритель pH имеет один элемент управления калибровкой, чтобы установить показание счетчика равным значению первого стандартного буфера, и второй элемент управления, чтобы отрегулировать показания счетчика до значения второго буфера. Третий контроль позволяет установить температуру. Стандартные буферные растворы, доступные от различных поставщиков, обычно документируют температурную зависимость контроля буфера.

Государственный стандартный образец (ГСО) – стандартный образец, признанный национальным органом по стандартизации, метрологии и сертификации, применяемый во всех областях народного хозяйства страны, включая сферы распространения государственного метрологического контроля и надзора [2].

Стандарт-титры представляют собой точные навески химических веществ, при растворении которых в определённом объеме воды получают буферные растворы – рабочие эталоны pH 3-го разряда с соответствующими значениями pH согласно ГОСТ 8.134-98, ГОСТ 8.135-2004 [3].

Рабочие эталоны pH, приготовленные из стандарт-титров, используются для поверки, градуировки и калибровки средств измерений (СИ) pH в соответствии с ГОСТ 8.120-99, для контроля метрологических характеристик СИ и погрешностей методик выполнения измерений pH жидких сред, при испытаниях и контроле качества продукции.

В настоящей работе оценены метрологические характеристики стандартных образцов pH и создана методика оценивания неопределённости pH при приготовлении стандартных образцов (эталон) pH.

В таблице 1 приведены состав и характеристики стандартных образцов pH.

Суммарная неопределённость pH стандартного образца pH, зависящая от неопределённостей содержания входящих в образец веществ, выражается следующей формулой:

$$U(pH) = pH \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{U(m_i)}{m_i} \right)^2}$$

где m_i – масса навесок вещества для приготовления буферного раствора

Таблица 1 – Стандартные образцы рН

Химические вещества, входящие в состав стандарт-титра	Масса* веществ, входящих в состав стандарт-титра, г	Концентрация вещества в рабочем эталоне, моль/кг	Значение рН рабочего эталона при 25 °С
Калий тетраоксалат $KH_3(C_2O_4)_2 \times 2H_2O$	12,610	0,05	1,65
Калия гидротартрат $KHC_4H_4C_6$	9,500	Насыщенный при 25 °С	3,56
Калий гидрофталат $KHC_8H_4O_4$	10,120	0,05	4,01
Калий дигидрофосфат KH_2PO_4 Натрия гидрофосфат Na_2HPO_4	3,390 3,530	0,025 0,025	6,86
Натрий тетраборат 10-водный $\Delta pH = \pm 0,01 pH$ $Na_2B_4O_7 \times 10H_2O$	3,810	0,010	9,18
Кальция гидроксид $Ca(OH)_2$	1,800	Насыщенный при 20 °С	12,43
*Примечание: приведены массы навесок для приготовления 1 дм ³ буферного раствора при 20 °С.			

Список литературы

1. Сергеев, А. Г. Метрология и метрологическое обеспечение : учеб. / А. Г. Сергеев. – М. : Высшее образование, 2008. – 575 с.
2. ГОСТ 8.315-97. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов. Основные положения. 1997.
3. ГОСТ 8.135-2004. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Стандарт-титры для приготовления буферных растворов – рабочих эталонов рН 2-го и 3-го разрядов. Технические и метрологические характеристики. Методы их определения; 2005.

A method for assessing pH uncertainty in the preparation of standard pH samples has been developed.

Андрукевич Алексей Петрович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, tranzoo@yandex.by

Научный руководитель – Василюк Геннадий Тимофеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, vasilyuk@grsu.by.

УДК 681.326.7

И. П. БЕЛОВ, А. С. ЛОТАШИНСКИЙ, Р. Р. КОРЕННОЙ

ШЕСТИКАНАЛЬНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ НАСТРОЙКИ ДВС НА ОСНОВЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА СЕМЕЙСТВА STM32

Представлены результаты разработки устройства для измерения давления по шести каналам для настройки двигателя внутреннего сгорания (ДВС) на основе микроконтроллера (МК) семейства STM32. Приведена структурная схема шестиканального измерителя давления.

В настоящее время наблюдается тенденция автоматизации всевозможных процессов, особенно технических, в связи с чем использование классических манометров для измерения давления газа в современных реалиях выглядит нецелесообразным. В связи с этим был разработан шестиканальный измеритель давления для настройки ДВС. Диапазон измеряемых давлений может колебаться от 20 до 110 КПа.

Разработанное устройство предназначено для измерения давлений, преобразования полученных данных, и отправки их через Bluetooth на внешнее устройство для их визуализации и принятия решения об алгоритме настройки.

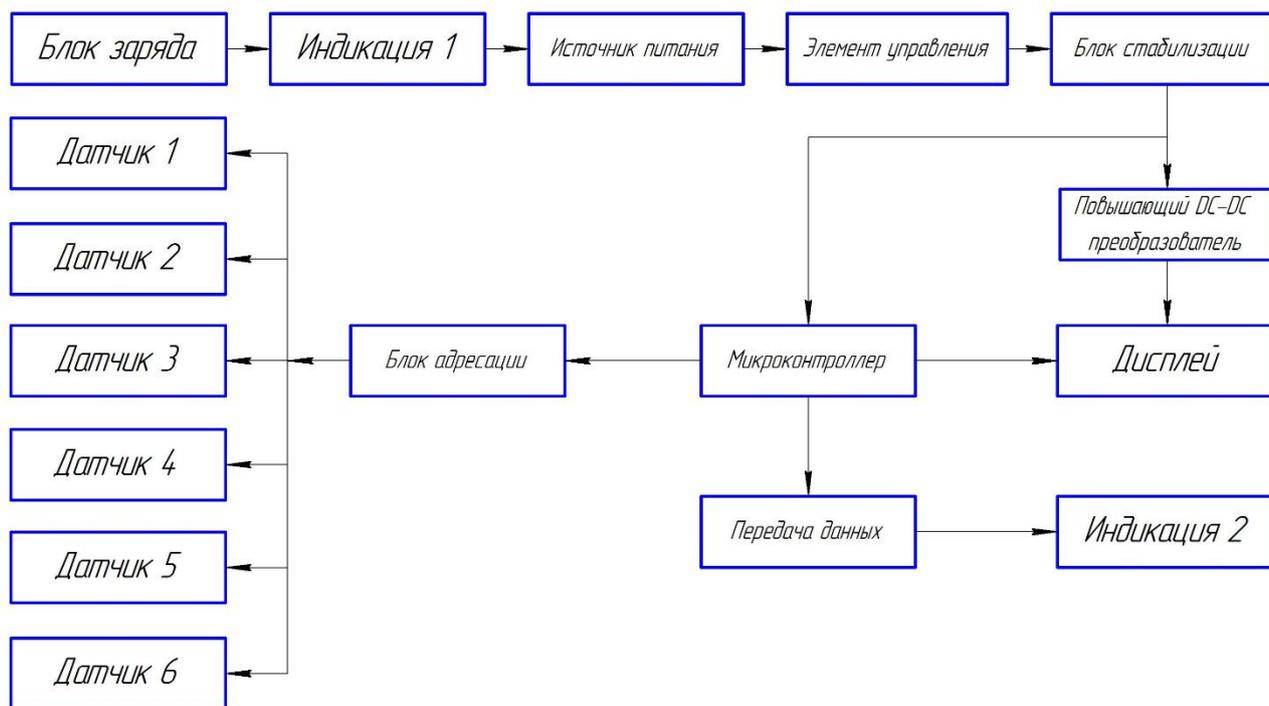


Рисунок 1 – Блок-схема шестиканального измерителя давления для настройки ДВС на основе микроконтроллера семейства STM32

Для реализации устройства основным элементом был выбран микроконтроллер STM32F103C8T. В качестве измерителя давления были выбраны датчики BMP180 с диапазоном измеряемого давления от 300 Па до 110 КПа. Датчик проводит измерения, используя пьезорезистивный чувствительный элемент и подключается к микроконтроллеру через интерфейс I2C. С учетом того, что датчики простые и имеют одинаковые собственные имена, а их необходимо 6, интерфейс I2C не может их адресовать, при этом возникает необходимость использовать расширитель интерфейса I2C, который позволит разделить наши датчики, присвоив каждому из них уникальный адрес.

Измерив давления и передав данные микроконтроллеру, необходимо отправить их на мобильное устройство. Для передачи данных был выбран Bluetooth-модуль HC05. Он подключен к МК по линиям передачи данных RX и TX. При получении данных модуль будет передавать их на мобильное устройство, предварительно подключившись к нему, и в разработанном приложении будут отображаться данные измерений.

В приложении значения отображаются в виде столбцов данных полученных от каждого из датчиков, также показывается среднее значение давлений, имеется возможность отключать отображение выбранных каналов, если ими не проводится измерения или данные от них не нужны.

В случае, если использование внешнего устройства неудобно, для отображения данных в схему добавлен дисплей. В качестве дисплея был выбран стандартный двухстрочный жидкокристаллический индикатор LCD1602, но так как он питается напряжением в 5 вольт, необходимо добавить повышающий DC-DC преобразователь, который подключается после блока стабилизации и на выходе выдает необходимое напряжение.

Блок зарядки обеспечивает контроль заряда литий-полимерного аккумулятора, являющегося основным источником питания разработанного устройства.

Список литературы

1. Датчики давления. Типы, характеристики, особенности, подбор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://kontech-system.com.ua/articles/datchiki-davlenija-tipy-harakteristiki-osobennosti-podbor/>. – Дата доступа: 27.10.2019.
2. Обзор датчика давления BMP180 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://robotchip.ru/obzor-datchika-davleniya-bmp180/>. – Дата доступа: 28.10.2019.
3. BST-BMP180-DS000-09 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf>. – Дата доступа: 30.10.2019.

4. HC-05 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.electronicastudio.com/docs/istd016A.pdf>. – Дата доступа: 30.10.2019.
5. stm32f103x8 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/CD00161566.pdf>. – Дата доступа: 30.10.2019.
6. XC6206 Series [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib/046/DOC003046726.pdf>. – Дата доступа: 30.10.2019.
7. TCA9548A Low-Voltage 8-Channel I²C SwitchwithReset [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tca9548a.pdf>. – Дата доступа: 17.11.2019
8. Tact switch series [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib/551/DOC001551972.pdf>. – Дата доступа: 17.01.2020.
9. MT-16S2D [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib/243/DOC000243342.pdf>. – Дата доступа: 15.02.2020.
10. STM Урок 6. Библиотека HAL. LCD 20×4. 4-х битный режим [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://narodstream.ru/stm-urok-6-biblioteka-hal-lcd-20x4-4-bitnyj-rezhim>. – Дата доступа: 21.02.2020.
11. Подключение дисплея 1602 (HD44780) (HAL) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://stormm.ru/2019/01/21/6-%D0%BF%D0%BE%D0%B4%D0%BA%D0%BB%D1%8E%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5-%D0%B4%D0%B8%D1%81%D0%BF%D0%BB%D0%B5%D1%8F-1602-hd44780>. – Дата доступа: 21.02.2020.
12. CE8301 Series [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mpja.com/download/ce830.pdf>. – Дата доступа: 21.02.2020.
13. Повышающий DC-DC преобразователь, принцип работы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://easyelectronics.ru/povyshayushhij-dc-dc-preobrazovatel-princip-raboty.html>. – Дата доступа: 21.02.2020.

The results of the development of a device for measuring pressure through six channels for tuning an internal combustion engine based on a microcontroller of the STM32 family are presented. The block diagram of a six-channel pressure meter is given.

Белов Иван Павлович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, belov_ip@grsu.by.

Лоташинский Александр Сергеевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, lotashinsky_as@grsu.by.

Коренной Ростислав Русланович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, korenij_r@grsu.by.

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, german@grsu.by.

УДК 621.3

А. Ч. БОБНИС

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА: НАЗНАЧЕНИЕ, КЛАССИФИКАЦИЯ, ОСНОВНЫЕ НОРМИРУЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Рассмотрены измерительные трансформаторы напряжения и тока, в частности, их назначение, виды, основные параметры и применение.

Измерительные трансформаторы – это группа электротехнических устройств, которые широко применяются для измерения значений основных параметров (ток, напряжение) в бытовых и промышленных сетях с частотой 50–60 Герц [1].

Основное предназначение данных устройств состоит в уменьшении начальных параметров тока либо напряжения в сети с целью обеспечения подключения измерительных приборов, различной автоматики, а также защитных систем (реле-прерыватели).

Подключение к сети измерительного трансформатора дает возможность разделить цепи высшего и низшего напряжения, чем обеспечивает дополнительную безопасность для работников профильных профессий (электромонтер, оператор силовых установок), особенно когда речь идет о сетях с высокими значениями тока и напряжения.

Существует множество параметров, по которым проводится классификация измерительных трансформаторов. В зависимости от конкретного критерия можно выделить следующие виды измерительных трансформаторов:

- основной критерий – тип измеряемого значения. Существуют измерительные трансформаторы тока и напряжения, которые работают на линиях с постоянным или переменным током;
- по коэффициенту трансформации изделия могут быть многодиапазонными или однодиапазонными;

- если в качестве критерия брать способ установки, то можно выделить внешние, накладные, переносные, встраиваемые и внутренние трансформаторы;
- в зависимости от конструкции устанавливают различные типы диэлектриков – масляные, газовые или сухие.

Представленная классификация позволяет описать все виды измерительных трансформаторов и правильно классифицировать их исходя из основных критериев.

В большинстве случаев изделия классифицируют только по основному критерию – типу измеряемого значения. Давайте рассмотрим этот аспект более подробно.

Когда напряжение является ключевым критерием:

Измерительные трансформаторы напряжения – отдельная группа электротехнических устройств, которые по принципу работы преобразуют высокое входящее напряжение в более низкое, удобное для работы контрольно-измерительной аппаратуры и приборов [1].

Основной режим работы – холостой ход, так как изделие не предназначено для передачи мощности.

По своей конструкции и принципу работы изделие практически не отличается от силового понижающего трансформатора – тот же стальной сердечник, одна первичная и несколько вторичных обмоток.

Принцип действия измерительных трансформаторов напряжения основан на понижении подводимого напряжения и изолировании подключенных после него измерительных приборов от влияния повышенного напряжения в сетях переменного тока.

Дополнительно повышается уровень безопасности для персонала, который обслуживает высоковольтные сети и снимает контрольные показания с приборов. Широкое применение такие изделия получили в релейных автоматических системах защиты и в различных электроустановках.

Благодаря включению в цепь питания этого трансформатора можно использовать стандартные контрольно-измерительные приборы для снятия точных показаний в линиях с высоким значением напряжения.

В противном случае пришлось бы существенно менять конструкцию измерительной аппаратуры и увеличивать ее в размерах за счет дополнительных катушек индуктивности, изоляции и других элементов.

Исходя из особенностей конструкции различают пять разновидностей трансформаторов напряжения [2]:

- заземляемый трансформатор напряжения – однофазный трансформатор напряжения, один конец первичной обмотки которого должен быть заземлен, или трехфазный трансформатор напряжения, нейтраль первичной обмотки которого должна быть заземлена;
- незаземляемый трансформатор напряжения – трансформатор напряжения, у которого все части первичной обмотки, включая зажимы, изолированы от земли до уровня, соответствующего классу напряжения;
- каскадный трансформатор напряжения – трансформатор напряжения, первичная обмотка которого разделена на несколько последовательно соединенных секций, передача мощности от которых к вторичным обмоткам осуществляется при помощи связующих и выравнивающих обмоток;
- ёмкостный трансформатор напряжения – трансформатор напряжения, содержащий ёмкостный делитель;
- двухобмоточный трансформатор напряжения – трансформатор напряжения, имеющий одну вторичную обмотку;
- трехобмоточный трансформатор напряжения – трансформатор напряжения, имеющий две вторичные обмотки: основную и дополнительную.

Примеры трансформаторов напряжения: И-510, УТН-1, НКФ-110, НКФ-220.

Основной критерий – переменный ток. Измерительные трансформаторы тока преобразовывают ток в цепи до заданных значений. Изделия широко используются в защитных реле как неотъемлемая часть энергетических систем и в первичных цепях электростанций, ток в которых достигает сотен киловольт.

Принцип действия измерительных трансформаторов тока заключается в снижении до необходимого уровня силы тока от первичного источника, к которому запитан измерительный прибор. Главное применение таких трансформаторов – контроль и снятие точных показаний в высоковольтных сетях.

Основная особенность устройства заключается в полном контроле силы тока и обеспечении безопасной работы с подключенной контрольно-измерительной аппаратурой, на которую ограничена подача тока высокого значения. Ещё одна особенность такого трансформатора заключается в том, что вторичная обмотка замыкается на контрольном измерительном приборе или защитной автоматике, а на первичную подается ток.

Практический пример использования – в бытовых и промышленных сетях электроснабжения, где через такой трансформатор подключается стандартный электрический счетчик.

По исполнению и применению трансформаторы тока бывают следующих видов:

- встроенный трансформатор тока – трансформатор тока, первичной обмоткой которого служит ввод электротехнического устройства;
- опорный трансформатор тока – трансформатор тока, предназначенный для установки на опорной плоскости;

- проходной трансформатор тока – трансформатор тока, предназначенный для использования его в качестве ввода;
- шинный трансформатор тока – трансформатор тока, первичной обмоткой которого служит одна или несколько параллельно включенных шин распределительного устройства (шинные трансформаторы тока имеют изоляцию, рассчитанную на наибольшее рабочее напряжение);
- втулочный трансформатор тока – проходной шинный трансформатор тока;
- разъемный трансформатор тока – трансформатор тока без первичной обмотки, магнитная цепь которого может размыкаться и затем замыкаться вокруг проводника с измеряемым током;
- Токоизмерительные клещи – ручной измерительный прибор, переносный разъемный трансформатор тока.

Постоянный ток. Измерительные трансформаторы постоянного тока получили широкое применение для снятия значений основных показателей в высоковольтных цепях. Принцип действия измерительного трансформатора постоянного тока аналогичен принципу действия магнитного усилителя и основан на нелинейности кривой намагниченности ферромагнитного сердечника от намагничивающего постоянного поля.

Это устройство состоит из ферромагнитного сердечника с, по меньшей мере, двумя обмотками – постоянного и переменного тока.

Вторичная обмотка включена в цепь вспомогательного источника переменного тока. При изменении постоянного тока в первичной обмотке изменяется магнитная индукция в сердечнике, что ведёт к изменению дифференциальной магнитной проницаемости сердечника и, соответственно, изменяется индуктивное реактивное сопротивление вторичной обмотки, что влечёт изменение тока во вторичной цепи, измеряемое тем или иным методом, например, амперметром переменного тока, шкала которого проградуирована в единицах постоянного тока в первичной цепи.

Примеры: И-512, И-523, УТТ-5М, Т-0,66, ТОЛУ-10.

К основным параметрам трансформаторов тока в соответствии с ГОСТ 7746 [3] относятся:

- номинальное напряжение: 110; 150; 220; 330; 500; 750; 1150 (кВ)
- номинальные первичные токи: 1; 5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 75; 80; 100; 150; 200; 300; 400; 500; 600; 750; 800; 1000; 1200; 1500; 2000; 3000; 4000; 5000; 6000; 8000; 10000; 12000; 14000; 16000; 18000; 20000; 25000; 28000; 30000; 32000; 35000; 40000 (А).
- наибольшие рабочие первичные токи трансформаторов на номинальные токи до 10000 А: 1; 5; 10; 16; 20; 32; 40; 50; 80; 100; 160; 200; 320; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 3200; 4000; 5000; 6300; 8000; 10000 (А).
- номинальный вторичный ток 1; 2; 5 (А).
- класс точности каждой вторичной обмотки: 0,1; 0,2; 0,2S; 0,5; 0,5S; 1; 3; 5; 10; 5P; 10P.
- номинальная предельная кратность вторичной обмотки, предназначенной для защиты: от 5 до 30.
- номинальный коэффициент безопасности приборов вторичной обмотки, предназначенной для измерений

– устанавливают в стандартах на трансформаторы конкретных типов.

- номинальная мощность каждой вторичной обмотки: 1; 2; 2,5; 3; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 50; 60; 75; 100 (ВА).
- номинальная частота напряжения сети: 50 или 60 Гц.

К основным параметрам трансформаторов напряжения в соответствии с ГОСТ 1983 [4] относят:

- номинальное напряжение: 110; 220; 330; 500; 750; 1150 (кВ).
- номинальное напряжение первичной обмотки: $110/\sqrt{3}$; $150/\sqrt{3}$; $220/\sqrt{3}$; $330/\sqrt{3}$; $500/\sqrt{3}$; $750/\sqrt{3}$; $1150/\sqrt{3}$;
- номинальное напряжение каждой вторичной обмотки: 100 и $100/\sqrt{3}$;
- класс точности каждой вторичной обмотки: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 3,0; 3P; 6P;
- номинальная мощность каждой вторичной обмотки: 10; 15; 25; 30; 50; 75; 100; 150; 200; 300; 400; 500; 600; 800; 1000; 1200 (ВА);
- предельная мощность: 160; 250; 400; 630; 1000; 1600; 2000; 2500 (ВА);
- номинальная частота напряжения сети: 50 или 60 Гц.

Измерительные трансформаторы напряжения предназначены для возможности измерения высокого напряжения электроустановок переменного тока путем снижения этого напряжения для подачи на защитные реле, приборы измерения и системы автоматики.

При отсутствии измерительных трансформаторов понадобилось бы применять приборы и реле с большими габаритными размерами, так как необходима надежная изоляция от высокого напряжения, которая увеличивает размеры устройств. Изготовить такое оборудование практически невозможно, так как напряжения линий могут достигать величины 110 киловольт.

Измерительные трансформаторы для замера напряжения дают возможность применять стандартные обычные приборы для измерений электрических параметров, при этом увеличивая их диапазон измерения. Защитные реле, подключаемые через эти трансформаторы, могут применяться обычного исполнения.

Гальваническая развязка, которую обеспечивают трансформаторы путем отделения измерительной цепи от высокого напряжения, позволяет создать необходимый уровень безопасности обслуживающего персонала.

Такие трансформаторы нашли свою популярность в устройствах высокого напряжения. От их качественного функционирования зависит степень точности учета расхода электрической энергии и электрических измерений, а также автоматических аварийных систем и защитных реле.

На современном производстве широко применяются измерительные трансформаторы. Также они нашли применение и в быденной жизни. Его использование необходимо тогда, когда непосредственное присоединение прибора для измерения, к электрической сети с переменным напряжением невозможно или небезопасно для персонала, обслуживающего его. А также для организации гальванической развязки первичных силовых цепей от измерительных. Расчёт и выбор измерительного трансформатора тока выполняется таким образом, чтобы изменения формы сигнала были сведены к нулю, а влияние на силовую контролируемую цепь было минимальным. Чувствительные приборы осуществляют защиту дорогостоящего оборудования, создают безопасные условия для человека. Они работают в электроцепях, создавая контроль над эксплуатационными параметрами.

Таким образом, измерительные трансформаторы тока и напряжения предназначены для уменьшения первичных токов и напряжений до значений, наиболее удобных для подключения измерительных приборов, реле защиты, устройств автоматики. Применение измерительных трансформаторов обеспечивает безопасность работающих, так как цепи высшего и низшего напряжения разделены, а также позволяет унифицировать конструкцию приборов и реле. А в настоящее время в технике больших токов и высоких напряжений измерения электрических величин можно производить только через измерительные трансформаторы – трансформаторы тока и трансформаторы напряжения, так как непосредственные измерения с применением шунтов и добавочных резисторов весьма затруднительны. Так, наибольший ток, который еще можно измерить непосредственным включением прибора, составляет 600 А, а напряжения – до 2 кВ. К тому же шунты и добавочные резисторы получаются громоздкими и дорогими из-за применения для них специальных сплавов, дающих незначительные температурные погрешности, а прикосновение к таким приборам в сетях высокого напряжения опасно для жизни. Измерительные трансформаторы применяют для подключения амперметров, вольтметров, ваттметров, приборов релейной защиты и электроавтоматики, счетчиков для учета выработки и расхода электрической энергии. От их работы зависит точность учета электрической энергии и измерения электрических параметров, правильность и надежность действия релейной защиты при повреждениях электрического оборудования и линий электропередач.

Список литературы

1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elektro-expo.ru/ru/articles/2016/izmeritelnye-transformatory-toka-i-napryazheniya>.
2. Трансформаторы силовые и измерительные : справ. / под ред. Е. Г. Акимова. – М. : Ай-Би-Тех, 2004. – Т. 1.
3. ГОСТ 7746-2015. Трансформаторы тока. Общие технические условия.
4. ГОСТ 1983-2015. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия.
5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Измерительный_трансформатор.

Current and voltage measuring transformers were considered, in particular, their purpose, types, main parameters and application.

Бобнис Анастасия Чеславовна, студентка физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, nasya.bobnis@mail.ru.

Научный руководитель – *Комар Владимир Николаевич*, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой электротехники и электроники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

УДК 547

Б. А. БОНДАРИК

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НОМИНАЛА МОНЕТ НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ATmega328

Устройство для определения номинала монет на базе микроконтроллера ATmega328 предназначено для автоматизации подсчета количества и общей суммы монет. Рассмотрен принцип работы монетоприемника, представлена схема соединения электронных компонентов.

В современном обществе с каждым днем возрастает популярность такого вида услуг как автоматизированная продажа товаров и услуг, что влечет за собой дальнейшее развитие этого направления. В середине 2016 года в Республике Беларусь в обиходе появились монеты, что обусловило актуальность устройства для определения номинала монет.

Устройство состоит из двух основных функциональных блоков: микроконтроллера ATmega328 и монетоприёмника. Микроконтроллер ATmega328 является наиболее эффективным среди возможных, так как устройства Arduino являются наиболее доступными и достаточно функциональными. Микроконтроллер является главным управляющим устройством, объединяющим остальные узлы схемы. Он производит считывание с монетоприемника и органов управления, а также отдает команды по выводу информации на дисплей.

Принцип работы монетоприёмника следующий: монета, проходящая через отверстие монетоприемника, на долю секунды оказывается между светопарой, происходит замер ИК-спектра фототранзистором, после монета попадает в отсек для монет. Замер происходит путём перекрытия определённой части инфракрасного излучения, поступающего из светодиода, идущего на фототранзистор. Чем больше излучения монета перекрыла, тем меньше попало на фототранзистор. На рисунке 1 изображён принцип работы монетоприемника.

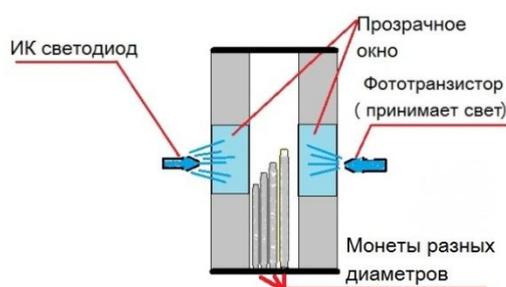


Рисунок 1 – Принцип работы монетоприёмника

Значение с фототранзистора сравнивается в момент прокатывания монеты, микроконтроллер записывает максимальное полученное значение с аналогового выхода, которое соответствует напряжению от 0 до 5 В, но представляется в числовой системе Arduino от 0 до 1023, и сравнивает его с ранее записанными в энергонезависимую память значениями, полученными ранее при калибровке устройства, номинал монеты выводится на ЖК экран.

Схема соединения электронных компонентов, представлена на рисунке 2.

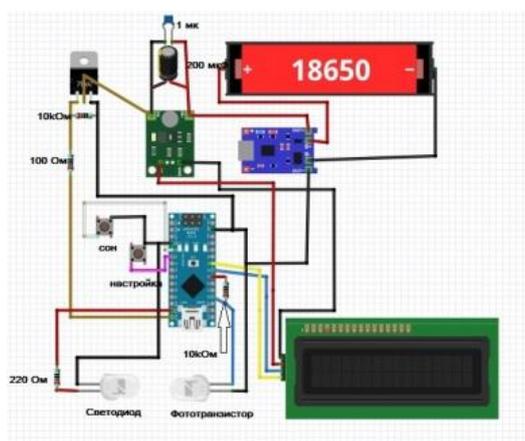


Рисунок 2 – Схема соединения электронных компонентов

Основная плата устройства содержит в себе следующие компоненты:

- ArduinoNano 3.0 (Atmega328);
- полевой транзистор с каналом N-типа IRLB3034PBF;
- плата зарядки-защиты TP4056;
- преобразователь напряжения от 3,7 В до 5 В;
- электролитический, керамический конденсаторы (200 мкФ и 1 мкФ);

- резисторы (10 кОм – 2 шт., 220 Ом – 1 шт., 100 Ом – 1 шт.).

Чертеж печатной платы устройства разрабатывался в программе «Sprint-Layout 5», он представлен на рисунке 3.

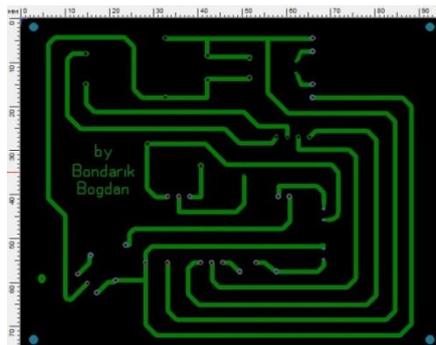


Рисунок 3 – Чертеж основной платы устройства

Основная плата устройства изображена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Основная плата устройства

Программирование микроконтроллера осуществляется при помощи специального программного обеспечения от фирмы-производителя «Arduino software», при использовании языка программирования C++.

Устройство для определения номинала монет работает в режиме калибровки и в режиме приема монет. Перед началом работы проводится калибровка устройства: нажатием кнопки перезагрузки платы, вызывается режим «Настройка» (рисунок 5), затем режим «Счётчик сброшен» (рисунок 6).



Рисунок 5 – Настройка

Данная процедура обнуляет число монет. Когда режим калибровки включен, бросаются монеты с номиналом, который указан на дисплее (рисунок 7).



Рисунок 6 – Счётчик сброшен

Система находит максимальное значение сигнала с датчика для каждой монетки и записывает его в память.



Рисунок 7 – Калибровка

Устройство может переходить в режим сна и пробуждается при касании монеты стенок монетоприёмника.



Рисунок 8 – Главный экран

В режиме статистики возможно отображение по номиналу и количеству монет. Данное сообщение выводится на экран (рисунок 9), отображается 15 секунд и устройство выходит в сон.



Рисунок 9 – Статистика по монетам

Убедиться в корректной работе проектируемого устройства, возможно по результатам экспериментальных диаграмм, отображающих принцип работы отдельных узлов. Снятые данные представлены на рисунке 10.

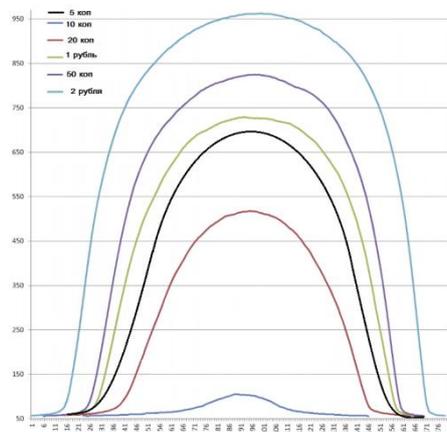


Рисунок 10 – Статистика по монетам

Как показывает график, каждая монета отлична от другой и покрывает разную площадь, проходя между полупроводниковыми приборами, благодаря чему достигаются различные напряжения, снятые с аналогового выхода, к которому подключен фототранзистор. Данной разницы достаточно для точного определения номинала монеты.

Устройство для определения номинала монет на базе микроконтроллера ATmega328 разработано с минимальными экономическими затратами, необходимой надежностью и точностью работы всех элементов.

Список литературы

1. Начало работы с ArduinoNano [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doc.arduino.ua/ru/guide/ArduinoNano>. – Дата доступа: 23.11.2019.

2. Промдизайн для электроники: как разработать корпус устройства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/promwad/blog/188534>. – Дата доступа: 15.12.2019.

3. Лазерно-утюжная технология [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sxem.net/master/45.php>. – Дата доступа: 02.12.2019.

The device for determining the face value of coins based on the ATmega328 microcontroller is designed to automate the calculation of the number and total amount of coins. The principle of operation of the coin acceptor is considered, a diagram of the connection of electronic components is presented.

Бондарик Богдан Александрович, студент 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, bondarik74@mail.ru.

Научный руководитель – *Авласевич Наталья Тадеушевна*, старший преподаватель кафедры информационных систем и технологий физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, avln@grsu.by.

УДК 621.316

Н. П. БОРОДАВКО

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

Предложены подходы к совершенствованию методов метрологического контроля (поверки и калибровки) средств измерений параметров электробезопасности.

В настоящее время для контроля метрологических характеристик средств измерений наряду с поверкой всё шире используется калибровка. Для защиты жизни и здоровья людей ужесточаются требования к электробезопасности в народном хозяйстве и быту. Вследствие этого несомненную актуальность приобретает совершенствование методов метрологического контроля (поверки и калибровки) средств измерений параметров электробезопасности.

К важнейшим параметрам электробезопасности относят сопротивление заземляющего устройства, сопротивление петли «фаза-нуль», ток срабатывания и время отключения устройства защитного отключения (УЗО), сопротивление изоляции.

Качество заземляющих устройств значительно влияет на безопасность использования электрических установок, особенно на эффективность защиты от поражения электрическим током и молниезащиты. Заземляющее устройство выполняет также другие функции, связанные с безопасностью, например, используется для отвода электрических зарядов объектов, подверженных угрозе взрыва (например, на АЗС).

Для проверки электрических установок на соответствие требованиям по защите от поражения электрическим током необходимо произвести измерение сопротивления заземляющего устройства. Это сопротивление позволяет определить значение напряжения прикосновения, которое может возникнуть при одновременном прикосновении к двум проводящим частям, находящимся под разными потенциалами, или к одной проводящей части, находящейся под напряжением, и к земле.

В электроустановках до 1000 В с глухозаземленной нейтралью безопасность обслуживания электрооборудования при пробое на корпус обеспечивается отключением поврежденного участка с минимальным временем. При замыкании фазного провода на соединенный с нейтралью трансформатора (или генератора) нулевой провод или на корпус оборудования образуется контур, состоящий из цепи фазного и нулевого проводников. Это контур принято называть петлей «фаза-нуль».

Характеристики устройств защиты и полное сопротивление петли «фаза-нуль» (в случае, когда сопротивлением в месте замыкания можно пренебречь), должны обеспечивать при замыкании на открытые проводящие части автоматическое отключение питания в пределах нормированного времени. Это требование выполняется при условии:

$$Z_s \cdot I_A \leq U_0, \quad (1)$$

где Z_s – полное сопротивление петли «фаза-нуль»;

I_A – ток, меньший тока замыкания, вызывающий срабатывание устройства защиты;

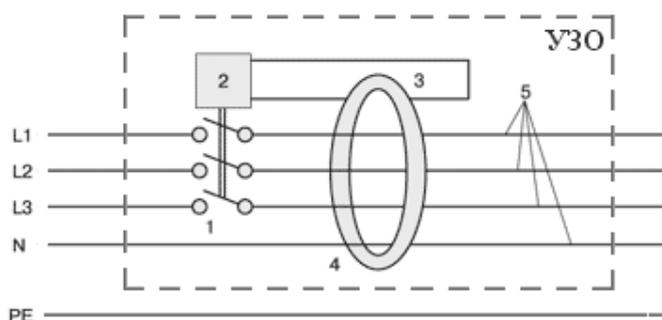
U_0 – номинальное напряжение (действующее значение) между фазой и землей.

Величину Z_s необходимо измерять для определения правильности используемой защиты.

Защитное отключение осуществляют устройствами двух типов, принципиально отличающихся друг от друга. Устройства первого типа реагируют на электрическое напряжение, появляющееся в аварийном режиме на корпусе электроприемника, к которому возможно прикосновение человека. Устройства второго типа реагируют на ток утечки на землю в защищаемой части, например, при случайном прикосновении человека к оголенной токоведущей части или при повреждении в защищенном электроприемнике или участке сети изоляции относительно корпуса или земли. Устройства второго типа нашли широкое применение в электроэнергетике, в то время как первого типа сегодня практически не применяются. Такие устройства получили название УЗО – устройства защитного отключения.

УЗО (рисунок 1) содержит так называемый дифференциальный трансформатор тока нулевой последовательности, к вторичной обмотке которого подключен чувствительный орган (реле), воздействующий на автоматический выключатель (защитный аппарат). Через окно сердечника трансформатора тока проходят нулевой и фазный провода, которые являются его первичной обмоткой.

В трехфазных электроустановках через окно сердечника проходят три фазных провода и нулевой. Принципиальная электрическая схема простейшего трехфазного УЗО включает в себя автоматический выключатель 1, которым управляет чувствительный орган 2, получающий сигнал на отключение со вторичной обмотки 3 трансформатора тока 4, сквозь окно которого проходят нулевой рабочий провод N и фазные провода L1, L2 и L3 (позиция 5). При равенстве токов (токов нагрузки) в нулевом и фазном (или в трех фазных) проводах их геометрическая сумма, как известно, равна нулю (ток в фазном проводе однофазного УЗО течет в одном направлении, а ток в нулевом проводе точно такого же значения течет в противоположном направлении). Поэтому тока во вторичной обмотке трансформатора тока нет. При замыкании или утечке тока на заземленный корпус электроприемника, а также при случайном прикосновении стоящего на земле или на токопроводящем полу человека к фазному проводу электрической сети, равенство токов в первичной обмотке трансформатора тока нарушится, поскольку по фазному проводу, помимо тока нагрузки, будет проходить ток замыкания или утечки, и в его вторичной обмотке появится ток. Если он равен или превышает ток срабатывания чувствительного органа (реле), то буквально за считанные доли секунды произойдет отключение аварийного участка сети.



1 – автоматический выключатель, 2 – чувствительный орган, 3 – вторичная обмотка, 4 – трансформатора тока, 5 – нулевой рабочий провод N и фазные провода L1, L2 и L3

Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема простейшего трёхфазного УЗО

Сопротивление изоляции – это параллельно включенное с токоведущей частью (жилой кабеля) сопротивление. Абсолютной разницы между диэлектрическим и резистивным состояниями нет, потому что в зависимости от условий одно и то же вещество может быть и диэлектриком, и резистором. Основное условие, разграничивающее поведение вещества на резистивное и диэлектрическое основано на понятии максвелловского времени диэлектрической релаксации и простейшая схема замещения диэлектрика представляет собой конденсатор с параллельным сопротивлением:

Реальные электроизоляционные конструкции далеко не всегда состоят из однородных диэлектриков. Они могут содержать композицию из разных диэлектриков или просто иметь границу раздела. Даже в этом случае появляются новые особенности электропроводности, в частности, следует учитывать не только проводимость самих диэлектриков, но и границ раздела. Само по себе наличие границы не меняет проводимость конструкции, однако поверхность неизбежно содержит химически активные элементы. В контакте с воздухом поверхность обогащается веществами, содержащимися в воздухе. Известно, что даже в контакте с чистым воздухом на поверхности адсорбируется вода, например, на поверхности окислов может содержаться до 100 молекулярных слоев воды. Возникает поверхностная проводимость, т. е. проводимость, связанная с появлением и движением носителей заряда по поверхности.

В настоящей работе оценены метрологические характеристики, используемые при калибровке средств измерений параметров электробезопасности, и создана методика оценивания неопределённости при таких

калибровочных работах. Обобщенная формула суммарной неопределенности метрологических характеристик при калибровке:

$$U(\Delta) = \Delta \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{U(x_i)}{x_i} \right)^2}, \quad (2)$$

где x_i – входные величины (метрологические характеристики, используемые при калибровке).

Список литературы

1. СТБ 8077-2017. Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Методы оценивания неопределенности измерений при калибровках. Общие положения. Примеры оценивания неопределенности измерений при калибровках : практ. пособие / под общ. ред. В. Л. Гуревича. – Минск : БелГИМ, 2017. – 62 с.

Approaches to improving the methods of metrological control (verification and calibration) of measuring instruments for electrical safety parameters are proposed.

Бородавко Николай Павлович, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, kborodavko@gmail.com

Научный руководитель – *Василюк Геннадий Тимофеевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, vasilyuk@grsu.by.

УДК 533.9.082,533.922,533.924,621.373.8,539.2,539.26,737.1

А. Г. БОСЯКОВА

ЛАЗЕРНАЯ АТОМНО-ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ МЕДНОЙ МОНЕТЫ

Исследованы возможности применения двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии для малодеструктивного анализа медной монеты. Исследованы возможности двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии для послойного анализа монет. В ходе эксперимента была определена динамика интенсивности спектральных линий меди по глубине монеты при возбуждении спектров лазерными импульсами с временным сдвигом.

При исследовании старинных монет, помимо выполнения стандартных требований к анализу, таких как минимальная деструкция поверхности образца, отсутствие предварительной химической и механической подготовки поверхности, точная локализация деструкции, необходимо соблюдать еще ряд условий. Так, иногда желательно проводить определение концентрации элементов по глубине, например, при оценке подлинности монет. Кроме того, необходимо учитывать, что в большинстве случаев исследователи имеют дело с образцами, долгое время находившихся в кладках, т. е. под воздействием агрессивных сред, приводящих к коррозии металлов. В связи с этим, на поверхности монет зачастую присутствует патина, а в самой структуре образцов происходят изменения, выражающиеся в повышении хрупкости.

Целью данной работы было исследование возможностей лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии для послойного анализа медных монет и определение интенсивности спектральных линий по глубине.

Лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия (ЛАЭС) – это один из методов атомно-эмиссионного качественного и количественного анализа, основанный на испарении вещества образца и последующем возбуждении спектров импульсным лазерным излучением. Данный подход, благодаря таким преимуществам, как малая деструкция поверхности (глубина повреждения – 10–100 мкм), высокая чувствительность (вплоть до концентрации элемента 10^{-4} %), отсутствие предварительной подготовки поверхности образца, возможность дистанционного исследования объектов, в том числе, находящихся под водой, широко применяется для исследования предметов из археологических раскопок

Исследования проводились на лазерном спектрометре LSS-1, производства совместного белорусско-японского предприятия «LOTIS-ТII» (Минск). В качестве источника испарения вещества образца и возбуждения спектров атомов использовался двухимпульсный Nd:YAG-лазер с активной модуляцией добротности. Основные параметры лазерного излучения: длина волны – 1064 нм; частота следования импульсов – 10 Гц; длительность на полувысоте – 15 нс; энергия 10–75 мДж. Для возбуждения спектров могут использоваться как одиночные импульсы, так и сдвоенные импульсы, временной интервал Δt между которыми может быть от 0 до 100 мкс (шаг 1 мкс). При фиксированных значениях энергии накачки и межимпульсного интервала энергия обоих импульсов одинакова. Нулевой межимпульсный интервал соответствует одновременному воздействию на поверхность двух лазерных импульсов, что можно рассматривать как

одиночный лазерный импульс, мощность которого равна суммарной мощности двоек импульсов. Все эксперименты проводились в атмосфере воздуха при нормальном давлении без предварительной химической и механической подготовки поверхности образца к анализу. Деструкция поверхности образца после воздействия лазерного излучения определялась с помощью микроинтерферометра Линника МИИ-4.

При исследовании старинных монет энергию двоек лазерных импульсов необходимо подобрать так, чтобы с одной стороны интенсивность спектральных линий всех элементов в несколько раз превышала уровень фона, а с другой стороны деструкция поверхности должна быть минимальной. Экспериментально были определены оптимальные параметры излучения двоек лазерных импульсов: энергия импульсов – 25 мДж, длительность лазерных импульсов – 15 нс, частота следования импульсов – 10 Гц, временной интервал между двоек лазерными импульсами – 10 мкс, число импульсов в точку поверхности – 15. При этом диаметр кратера на поверхности исследуемой монеты составлял 40 мкм, глубина – 45 мкм.

Все эксперименты проводились в атмосфере воздуха при нормальном давлении без предварительной химической и механической подготовки поверхности образца к анализу.

Объектом исследования являлась старинная монета номиналом 5 копеек 1788 года (рис. 1). Изучение позволило определить, что анализируемая монета является самой распространенной разновидностей и встречается довольно часто. Стоимость в среднем составляет 8 долларов за монету в очень хорошем состоянии (VF).

Использование двоек лазерных импульсов с микросекундным межимпульсным интервалом позволяет проводить послойный анализ микронных покрытий, что позволяет определить динамику интенсивности спектральных линий меди по глубине монеты при возбуждении спектров лазерными импульсами с временным сдвигом $\Delta t = 10$ мкс (рис. 2).



Рисунок 1 – Фотография монеты 1788 года Императрицы Екатерины II

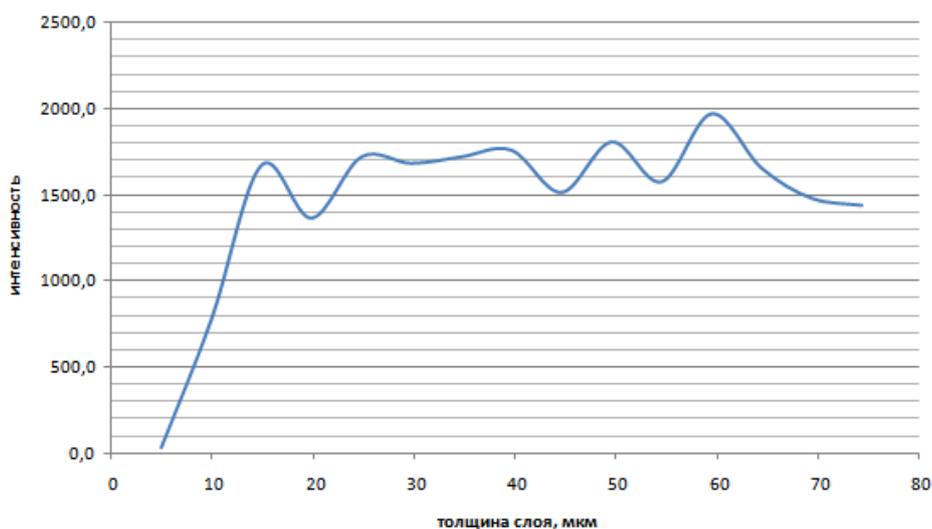


Рисунок 2 – Зависимость интенсивности спектральных линий меди от глубины

Двухимпульсная лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия является предпочтительным методом малодеструктивного анализа старинных монет, т. к. позволяет оценить подлинность монет, а также определить концентрацию элементов по слоям. К преимуществам данного метода атомно-эмиссионного исследования относится возможность точно задать место воздействия лазерного луча, например, испарять металл с гурта монеты, кроме того, анализ может проводиться без предварительной подготовки поверхности – удаления патины и загрязнений. покрытия, его толщине, содержании компонентов в медно-серебряной основе. Лазерный микроанализ помимо определения концентрации элементов в старинных монетах дает возможность выявить наличие микрополостей в объеме образца, и оценить их объем

Список литературы

1. Воропай, Е. С. Элементный анализ серебряных монет методом двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии / Е. С. Воропай, К. Ф. Ермалицкая, В. М. Сидорович, А. Н. Плавинский // Вестн. БГУ. Сер. 1. – 2013. – № 1. – С. 11–17.
2. Ермалицкая, К. Ф. Лазерный микроанализ старинных монет, предметов искусства и живописи / К. Ф. Ермалицкая // Традиции и современное состояние культуры и искусств : материалы VI междунар. науч.-практ. конф. – Минск, 2015. – С. 145–152.
3. Ермалицкая, К. Ф. Двухимпульсная лазерная атомно-эмиссионная спектрометрия бронзовых сплавов и покрытий / К. Ф. Ермалицкая, Е. С. Воропай // ЖПС. – 2010. – Т. 77, № 2. – С. 165–172.
4. Гулецкий, Д. В. Лазерный микроанализ корродированных старинных серебряно-медных монет / Д. В. Гулецкий, К. Ф. Ермалицкая // Вестн. БГУ. Сер. 1. – 2016. – № 2.

Босякова Алина Григорьевна, физический факультет Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, alinabosakova@gmail.com.

Научный руководитель – *Ермалицкая Ксения Федоровна*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета Белорусского государственного университета, ermalitskaia@gmail.com.

УДК 631.432.2

С. И. ВАЛЮК

ОЦЕНИВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭТАЛОНОВ (СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ) ВЛАЖНОСТИ

Разработана методика оценивания неопределенности влажности стандартных образцов влажности.

Влажность – показатель содержания воды в физических телах или средах [1]. Влажность можно характеризовать также влагосодержанием, или абсолютной влажностью – количеством воды, отнесённым к единице массы сухой части материала. Относительная влажность характеризует содержание влаги по сравнению с максимальным количеством влаги, которое может содержаться в веществе в состоянии термодинамического равновесия. В настоящее время весьма актуально совершенствование методов метрологического контроля средств измерений влажности (с применением стандартных образцов).

Стандартный образец (СО) – образец вещества (материала) с установленными в результате метрологической аттестации значениями одной или более величин, характеризующим свойства или состав этого вещества (материала).

Применение стандартных образцов незаменимо при поверке и юстировке приборов на заводах при серийном выпуске, а также при поверке автоматических влагомеров, установленных в технологических линиях, что исключает демонтаж прибора и доставку в поверочную лабораторию.

В настоящее время во влагометрии для поверки влагомеров (анализаторов влажности) применяются СО, которые можно разделить на СО натуральных веществ и СО-имитаторы, средства измерений с приписанным значением влажности исходя из зависимости информативного параметра от влажности.

В настоящей работе создана методика оценивания метрологических характеристик (и их неопределенности) эталонов (стандартных образцов) влажности.

При подготовке образцы увлажняют, добавляя рассчитанное количество дистиллированной воды для получения требуемого значения влажности.

Необходимое количество воды для увлажнения $M_{\text{н}}$, г, рассчитывают по формуле:

$$M_{\text{н}} = \frac{M_{\text{н}}(W_{\text{тп}} - W_{\text{н}})}{100 - W_{\text{тп}}} \quad (1)$$

где $M_{\text{н}}$ – начальная масса образца, г ; $W_{\text{тп}}$ – требуемая влажность, % ; $W_{\text{н}}$ – начальная влажность, %.

Аттестованное значение влажности образца устанавливают измерением влажности образца на эталонной вакуумно-тепловой установке 1-го разряда по ГОСТ 8.432 [2] или на установке высшей точности УВТ 15А-81.

Значение влажности образца W в процентах рассчитывают по формуле:

$$W = \frac{m_{\text{з}} - m_{\text{с}}}{m_{\text{з}}} \cdot 100 - K \quad (2)$$

где $m_{\text{з}}$ – масса образца до подсушивания, г;

$m_{\text{с}}$ – масса образца после обезвоживания, г;

K – коэффициент коррекции.

Аттестованное значение влажности образца определяют как среднее арифметическое значение влажности n образцов. Число навесок при аттестации на эталонной вакуумно-тепловой установке – 6, на установке высшей точности – 18.

Границы интервала ΔW , в котором с принятой доверительной вероятностью $P = 0,95$ находится погрешность аттестованного значения влажности образца, рассчитывают по формуле:

$$\Delta W = K \sqrt{(\overline{S_w})^2 + \frac{(\Theta)^2}{3}} \quad (3)$$

где Θ – значение неисключенной систематической составляющей погрешности образцовой вакуумно-тепловой установки; $\overline{S_w}$ – среднее квадратическое отклонение среднего результата измерений влажности, рассчитанное по формуле:

$$\overline{S_w} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2}{n(n-1)}} \quad (4)$$

где w_i – i -е значение влажности образца, % ;

$\bar{w} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{n}$ – среднее арифметическое значение влажности образца, %;

K – коэффициент, полученный в соответствии с ГОСТ 8.207, по формуле

$$K = \frac{\xi + \Theta}{\overline{S_w} + \frac{\Theta}{\sqrt{3}}} \quad (5)$$

где ξ – доверительные границы случайной составляющей погрешности результата измерений $\xi = t \cdot \overline{S_w}$, где t – коэффициент Стьюдента: при $n = 6$ и доверительной вероятностью $P = 0,95 \cdot t = 2,517$; при $n = 18$ и $P = 0,95 \cdot t = 2,101$.

Суммарную неопределенность влажности образца, в соответствии с математической моделью измерения (2), оценивают по формуле:

$$U(W) = \bar{W} \cdot \sqrt{\left(\frac{U(m_{\text{з}})}{m_{\text{з}}}\right)^2 + \left(\frac{U(m_{\text{с}})}{m_{\text{с}}}\right)^2 + \left(\frac{U(K)}{K}\right)^2} \quad (6)$$

Список литературы

1. Физическая энциклопедия / гл. ред. А. М. Прохоров. – М. : Сов. энциклопедия, 1988. – Т. 1. – 704 с.
2. ГОСТ 8.432-81. Государственная система обеспечения единства измерений «Влажность зерна и зернопродуктов».

A methodology for assessing the uncertainty of humidity of standard samples has been developed.

Валюк Светлана Игоревна, студентка 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

Научный руководитель – *Василюк Геннадий Тимофеевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей физики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

УДК 631.432.2

Д. А. ДРОБЫШ

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ

Дано краткое определение понятия качества электрической энергии и его параметров. Изучена актуальность необходимости измерения качества электрической энергии и ее методика. На основании проведенной работы сделан вывод о рекомендуемых условиях и оборудовании, необходимых для измерения качества.

В наше время электроэнергия активно используется практически во всем мире. Однако производство, передача и сбыт электроэнергии являются высоко затратными процессами, а источники ограничены, в связи с чем поиск методов наиболее эффективной эксплуатации электроэнергии всегда актуален. Для улучшения эксплуатации необходимо решить ряд проблем, таких как: потери электроэнергии, износ линий электропередач и электрооборудования и т. д. Процесс улучшения эксплуатации напрямую связан с измерением качества электрической энергии.

Качество электрической энергии – степень соответствия параметров электрической энергии их установленным значениям. В свою очередь, параметр электрической энергии – величина, количественно характеризующая какое-либо свойство электрической энергии [1].

Качество электрической энергии может меняться в зависимости от времени суток, погодных и климатических условий, изменения нагрузки энергосистемы, возникновения аварийных режимов в сети и т. д. Снижение качества электроэнергии становится причиной:

- 1) увеличения потерь во всех элементах электрической сети;
- 2) перегрева вращающихся машин, ускоренного износа изоляции, сокращения срока службы и в некоторых случаях выхода из строя электрооборудования;
- 3) роста потребления электроэнергии и требуемой мощности электрооборудования;
- 4) нарушения работы и ложных срабатывания устройств релейной защиты и автоматики;
- 5) сбоя в работе электронных систем управления, вычислительной техники и специфического оборудования;
- 6) вероятности возникновения однофазных коротких замыканий из-за ускоренного износа изоляции машин и кабелей с последующим переходом однофазных замыканий в многофазные;
- 7) появления опасных уровней наведенных напряжений, то есть напряжений, образующихся на проводах и тросах отключенных или строящихся высоковольтных воздушных линий электропередачи, находящихся вблизи действующих;
- 8) помех в теле- и радиоаппаратуре, ошибочной работе рентгеновского оборудования;
- 9) неправильной работы счетчиков электрической энергии [2].

Измерение качества электроэнергии позволяет обнаружить и преодолеть вышеперечисленные проблемы, следовательно, является актуальным на различных объектах с любыми потребителями электроэнергии, от промышленных заводов и больниц, до сетей электроснабжения как низкого (до 1 кВ), так и среднего (от 1 до 35 кВ) напряжения.

В данном исследовании предпринята попытка изучить методику измерения качества электроэнергии сетей Научно-технологического парка ГрГУ им. Янки Купалы (далее – технопарк). На базе технопарка ведутся исследования и разработки с использованием различного информационно-измерительного и технологического электрооборудования высокой точности. Соответственно, снижение качества электроэнергии, кроме увеличения потерь электроэнергии и износа электрооборудования, может приводить к некачественному выполнению работ и ошибкам. Следовательно, регулярное измерение качества электроснабжения является принципиально важным.

Установленные значения параметров качества электрической энергии определены в международном стандарте «О нормах качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» ГОСТ 2013-32144 [3].

Изменения параметров напряжения электропитания в точке передачи электрической энергии пользователю электрической сети, подразделяют на две категории – продолжительные изменения характеристик напряжения и случайные события.

Случайные события представляют собой внезапные и значительные изменения формы напряжения, приводящие к отклонению его параметров от номинальных. Данные изменения напряжения, как правило, вызываются непредсказуемыми событиями (например, повреждениями оборудования пользователя электрической сети) или внешними воздействиями (например, погодными условиями или действиями стороны, не являющейся пользователем электрической сети) [3].

Продолжительные изменения характеристик напряжения электропитания представляют собой длительные отклонения характеристик напряжения от номинальных значений и обусловлены, в основном, изменениями нагрузки или влиянием нелинейных нагрузок.

В данном исследовании рассматриваются продолжительные изменения. Применительно к продолжительным изменениям характеристик напряжения электропитания, относящихся к частоте, значениям, форме напряжения и симметрии напряжений в трехфазных системах, установлены следующие нормы и показатели качества, измеренные в соответствии с требованиями международного стандарта «О методах измерений показателей качества электрической энергии» ГОСТ 30804.4.30 [4]:

1. Отклонение основного значения частоты напряжения от номинального, Δf , Гц:

$$\Delta f = f_m - f_{nom}$$

где f_m – значение основной частоты напряжения электропитания, Гц; f_{nom} – номинальное значение частоты напряжения электропитания, Гц.

2. Медленные изменения напряжения (продолжительностью больше одной минуты):

- Положительные, $\delta U_{(+)}$, %:

$$\delta U_{(+)} = [(U_{m(+)} - U_0)/U_0] \cdot 100;$$

- Отрицательные, $\delta U_{(-)}$, %:

$$\delta U_{(-)} = [(U_0 - U_{m(-)})/U_0] \cdot 100;$$

где $U_{(+)}$, $\delta U_{(-)}$ – значения напряжения, меньшие U_0 и большие U_0 соответственно; U_0 – напряжение, равное стандартному номинальному, или согласованному, напряжению.

3. Колебания напряжения (продолжительностью менее одной минуты) измеряются в соответствии со стандартом «Об электромагнитной совместимости. Фликерметр» ГОСТ Р 51317.4.15-2012 [5]:

- Кратковременная доза фликера, P_{st} ;
- Длительная доза фликера, P_{lt} ;

Измерения проводятся фликерметром, дозы фликера являются численными значениями.

4. Гармонические составляющие напряжения:

• значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка $K_{U(n)}$ в процентах напряжения основной гармонической составляющей (прямой последовательности) U_1 ;

- значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, K_U , %:

$$K_U = (\sum_{i=1}^n K_{U(n)})/n.$$

5. Несимметрия напряжений в трехфазных системах:

- коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности, K_{2U} , %:

$$K_{2U} = (U_2/U_1) \cdot 100,$$

где U_2 – напряжение обратной последовательности;

- коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности, K_{0U} , %:

$$K_{0U} = (U_0/U_1) \cdot 100 [4].$$

Данные параметры измеряются при помощи анализаторов качества электроэнергии.

Для технопарка сетевое напряжение составляет 230/400 В, частота составляет 50 Гц. Соответственно для измерения качества необходимо устройство, работающее с диапазонами напряжений и частот, в которые входят данные значения. Анализатор серии PQM марки 703 обеспечивает измерение и регистрацию следующих параметров:

1. Действующие значения фазного и линейного напряжения в диапазоне до 760 В (± 1500 В пикового значения);
2. Скачки напряжения при переходных процессах (перенапряжения) в диапазоне до ± 6 кВ;
3. Действующее значение тока до 3000 А (пикового до ± 10 кА), до 1000 А (пикового до ± 3600 А), до 10 А (пикового до ± 36 А), или до 100 А (пикового до ± 360 А);
4. Коэффициент пиковых значений силы тока и напряжения;
5. Частота сети в диапазоне 40...70 Гц;
6. Активная, реактивная, полная мощность и энергия, мощность нелинейных искажений;
7. Гармонические составляющие напряжений и токов (до 50-й);
8. Коэффициенты гармонических искажений THDF и THDR для тока и напряжения;
9. Коэффициент потерь К, вызванных высшими гармониками (К-фактор);
10. Активную и реактивную мощности гармонических составляющих;
11. Угол фазового сдвига между напряжением и током;
12. Коэффициенты несимметрии трёхфазной сети и симметричных составляющих;
13. Величина дозы фликеров Pst и Plt;
14. Интергармоники напряжений и токов (до 50-й) [6].

Соответственно его применение в рамках данного исследования является оптимальным.

В дальнейшем при проведении исследования планируется отработать методику измерения качества электрической энергии сетей технопарка с целью оптимизации и совершенствования их эксплуатации.

Список литературы

1. Качество электрической энергии [Электронный ресурс] // Википедия. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>. – Дата доступа: 08.03.2020.
2. Нормы качества электрической энергии: параметры, факторы повышения и снижения качества [Электронный ресурс] // ПУЭ8. – Режим доступа: <https://pue8.ru/kachestvo-elektroenergii/58-normy-kachestva-elektricheskoy-energii.html/>. – Дата доступа: 08.03.2020.
3. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Электронный ресурс]. – Введ. 2013-03-25. – М. : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации // Техноэксперт. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200104301/>. – Дата доступа: 08.03.2020.
4. ГОСТ 30804.4.30-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии [Электронный ресурс]. – Введ. 2014-01-01. – М. : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации // Техноэксперт. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200104665/>. – Дата доступа: 08.03.2020.
5. ГОСТ 51317.4.15-2012. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4-15. Методы измерений и испытаний. Фликерметр. Функциональные и конструктивные требования [Электронный ресурс]. – Введ. 2013-01-01. – М. : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации // Техноэксперт. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200096463/>. – Дата доступа: 08.03.2020.
6. PQM-703. Анализатор параметров качества электрической энергии [Электронный ресурс] // Приборы для анализа качества электроэнергии. Sonel. – Режим доступа: <http://www.sonel.ru/ru/products/power-quality/detail.php?id4=572/>. – Дата доступа: 08.03.2020.

A brief definition of the concept of the quality of electric energy and its parameters is given. The relevance of the need to measure the quality of electric energy and its methodology have been studied. Based on the work done, a conclusion is drawn about the recommended conditions and equipment necessary for measuring quality.

Дробыш Даниил Александрович, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, numetalfan2@gmail.com.

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, декан физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, german@grsu.by.

Д. А. ДРОБЫШ

СРАВНЕНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Дано краткое описание кристаллических и тонкопленочных солнечных панелей и их теоретическое сравнение. Проведен их сравнительный анализ по вырабатываемой мощности, занимаемой площади и стоимости. По данным анализа сделан вывод о предпочтительности использования кристаллических панелей.

В наше время нетрадиционная энергетика постепенно вытесняет традиционную в связи с ее неисчерпаемостью, доступностью и безопасностью для окружающей среды. Солнечная энергетика – одно из направлений данной энергетике. Разработки из данной области внедряются во многих странах, так как в них видят большие перспективы. Существуют прогнозы, согласно которым солнечная энергетика будет составлять основную часть альтернативной энергетике, всвязи с чем ее внедрение и активное использование на территории Республики Беларусь так же является важным для развития энергетике страны.

Для преобразования солнечной энергии в электрическую применяются солнечные панели. Наиболее распространенными являются кремниевые кристаллические панели. Данные панели представляют собой материал-полупроводник (плотно совмещённые два слоя материалов с разной проводимостью). Для возникновения перехода электронов из одного материала в другой необходимо, чтобы один из слоёв имел избыток электронов, а другой – их недостаток. Переход электронов в область с их недостатком называют $p-n$ -переходом. Данные панели подразделяются на моно- и поликристаллические [1].

Кроме кристаллических, популярность приобретают тонкопленочные панели. Сегодня тонкопленочные батареи распространены гораздо меньше, чем их кристаллические аналоги. Однако многие специалисты утверждают, что будущее солнечной энергетике как раз за тонкопленочными фотоэлементами.

Сравнивая с существующими видами солнечных панелей, которые выпускаются промышленно, тонкопленочные солнечные батареи имеют ряд несомненных преимуществ:

- монтаж таких пленок возможен на поверхность различной конфигурации: окна домов, южные фасады сооружений, кузова автомашин, делая их настоящими источниками альтернативной энергии;
- меньшая потребность в материалах при изготовлении;
- очень легкие, что позволяет снять все ограничения по применению;
- в меньшей степени зависят от наклона падения лучей, чем кристаллические;
- электроэнергия вырабатывается даже от рассеянного солнечного излучения;
- не так чувствительны к температурным перепадам и перегреву.

Однако они имеют ряд недостатков:

- более значительные габариты (при одинаковой мощности они занимают примерно в 2,5 раза больше места);
- несмотря на меньшую потребность в материалах итоговая цена выше;
- меньше срок службы (10–12 лет против 20–25 у кристаллических);
- более низкий КПД.

Для сравнения данных типов солнечных панелей следует произвести расчет их мощностей и сравнить их стоимость и занимаемую площадь. Берется условный объект в Гродненской области. Так как для расчетов каждого типа панелей используются одни и те же условия, потерями на разряд-заряд аккумулятора можно пренебречь. Также несмотря на разные напряжения учитывать стоимость аккумуляторов, контроллеров и инверторов нет необходимости, так как выходное напряжение можно регулировать, комбинируя последовательный и параллельный способы подключения панелей между собой.

Для сравнения используются кремниевая монокристаллическая солнечная панель YingliSolar номинальной мощностью $P_w = 285$ Вт, площадью 1664×998 мм ($1,66 \text{ м}^2$), напряжением постоянного тока 24 В и ценой 412 руб./шт.; и тонкопленочная гибкая солнечная панель SolarBoard номинальной мощностью $P_w = 30$ Вт, площадью 640×340 мм ($0,2176 \text{ м}^2$), напряжением постоянного тока 18 В и ценой 65 руб./шт. [2];

Суточное потребление условного объекта принимается равным $W_c = 5000 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$. Далее рассчитывается мощность для месяцев с самой большой и самой малой солнечной радиацией (инсоляцией) в году. Для Гродненской области – это май с инсоляцией $E_{max} = 4,98 \text{ кВт} \cdot \frac{\text{ч}}{\text{м}^2}$ и декабрь с инсоляцией $E_{min} = 0,61 \text{ кВт} \cdot \frac{\text{ч}}{\text{м}^2}$.

Необходимо определить количество электроэнергии, которое способна выработать одна панель за сутки летом и зимой по формуле:

$$W = \frac{k P_w E}{1000};$$

где k – поправочный коэффициент, он делает поправку на потерю мощности солнечных элементов при нагреве на солнце, а также учитывает наклон падения лучей на поверхность модулей в течение дня; для летнего периода он равен $k_{\text{л}} = 0,5$, для зимнего $k_{\text{з}} = 0,7$; 1000 Вт/м^2 – это интенсивность солнечной радиации [3].

$$W_{\text{л}} = \frac{0,5 \cdot 285 \cdot 4,98}{1000} = 709,6 (\text{Вт} \cdot \text{ч}),$$

$$W_{\text{з}} = \frac{0,7 \cdot 285 \cdot 0,61}{1000} = 121,7 (\text{Вт} \cdot \text{ч}).$$

Далее находится необходимое количество панелей:

$$N = W_c / W;$$

$$N_{\text{л}} = \frac{5000}{709,6} = 7,046 \approx 7 (\text{шт});$$

$$N_{\text{з}} = \frac{5000}{121,7} = 41,08 \approx 41 (\text{шт}).$$

Зная количество панелей, можно найти их суммарную стоимость (условно следует обозначить как C):

$$C_{\text{л}} = 7 \cdot 412 = 2884 (\text{руб});$$

$$C_{\text{з}} = 41 \cdot 412 = 16802 (\text{руб}).$$

Затем найти занимаемую площадь:

$$S_{\text{л}} = 1,66 \cdot 7 = 11,62 (\text{м}^2);$$

$$S_{\text{з}} = 1,66 \cdot 41 = 68,09 (\text{м}^2).$$

Аналогично определяется количество электроэнергии, которое способна выработать одна панель за сутки летом и зимой. Однако, так как тонкопленочные панели меньше подвержены перегреву и меньше зависят от угла падения солнечных лучей на плоскость панели, их поправочные коэффициенты увеличатся: для летнего периода $k_{\text{л}} = 0,6$, для зимнего $k_{\text{з}} = 0,8$. Также, так как данные панели при рассеянном освещении (в пасмурную погоду) работают эффективнее кристаллических, итоговое количество электроэнергии следует увеличить на 10 % для летнего и 15 % для зимнего периода:

$$W_{\text{л}} = \frac{0,8 \cdot 30 \cdot 4,98 \cdot 1,1}{1000} = 98,6 (\text{Вт} \cdot \text{ч}),$$

$$W_{\text{з}} = \frac{0,6 \cdot 30 \cdot 0,61 \cdot 1,15}{1000} = 16,84 (\text{Вт} \cdot \text{ч}).$$

Далее находится необходимое количество панелей:

$$N_{\text{л}} = \frac{5000}{98,6} = 50,7 \approx 51 (\text{шт});$$

$$N_{\text{з}} = \frac{5000}{16,84} = 296,9 \approx 297 (\text{шт}),$$

и рассчитывается суммарная стоимость и занимаемая площадь панелей:

$$C_{\text{л}} = 51 \cdot 65 = 3315 (\text{руб});$$

$$C_{\text{з}} = 297 \cdot 65 = 19305 (\text{руб});$$

$$S_{\text{л}} = 0,2176 \cdot 51 = 11,09 (\text{м}^2);$$

$$S_{\text{з}} = 0,2176 \cdot 297 = 64,63 (\text{м}^2).$$

Из расчета видно, что тонкопленочные панели занимают меньшую площадь, чем кристаллические, также их можно устанавливать в местах, недоступных для кристаллических, что является ощутимым преимуществом. Однако кристаллические панели дешевле, так же их срок службы значительно дольше (в среднем 20–25 лет), чем у тонкопленочных (в среднем 10–12 лет). Кроме этого, кристаллические панели в данное время являются гораздо более доступными, с их покупкой на территории Республики Беларусь не возникает никаких сложностей; в то время как тонкопленочные можно приобрести только за границей.

Исходя из перечисленного, можно сделать вывод, что для крупных предприятий гораздо более выгодным является использование кристаллических панелей, в связи с их меньшей стоимостью и большим сроком

службы. Тонкопленочные подойдут для небольших объектов (например – отдельных квартир в многоквартирных домах, отдельных приборов), так как позволят сэкономить занимаемую площадь. Однако в мире ведется много разработок по совершенствованию тонкопленочных панелей, и, если в будущем удастся увеличить их срок службы или уменьшить себестоимость, для Республики Беларусь они будут более предпочтительными, так как лучше работают при рассеянном освещении.

Список литературы

1. Устройство и принцип работы солнечной батареи [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <https://teplo.guru/eko/ustroystvo-solnechnoy-batarei.html>. – Дата доступа: 10.12.2018.
2. Солнечные панели в Украине [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа: <https://prom.ua/Fotoelementy-i-solnechnye-paneli>. – Дата доступа: 10.12.2018.
3. Альтернативные источники энергии [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: <http://www.energya.by/kak-rasschitat-moshhnost-solnechnyih-batarey>. – Дата доступа: 10.12.2018.

A brief description of crystalline and thin-film solar panels and their theoretical comparison is given. A comparative analysis of the generated capacity, occupied space and cost is carried out. According to the analysis, it was concluded that the use of crystalline panels is preferable.

Дробыш Даниил Александрович, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, numetalfan2@gmail.com.

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, декан физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, german@grsu.by.

УДК 53.083.98:620.191.4

М. А. ЖЕРНАК, Н. Н. КУРЬЯН

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА

Цель работы – изучить методы получения наночастиц серебра и их применение.

Наночастицы серебра привлекают особое внимание благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам, связанным со значительной величиной отношения площади их поверхности к объему, и другим размерным эффектам [1]. Широкое применение наночастиц серебра связано с их особыми свойствами: электрофизическими, оптическими, каталитическими. Это обусловлено увеличением числа атомов металла на поверхности частиц по сравнению с числом атомов в объеме [2; 3]. Например, наночастицы серебра могут использоваться для модификации топливных элементов, создания электрохимических сенсоров, а также в составе различных биомедицинских препаратов.

В настоящее время можно выделить несколько способов получения наночастиц серебра (рисунок 1).



Рисунок 1 – Способы получения наночастиц серебра

По принципу воздействия методы получения наночастиц можно разделить на две большие группы [4]:

1. Диспергационные методы – методы получения наночастиц путем измельчения макрообразца (конденсация при сверхнизких температурах, варианты химического, фотохимического и радиационного восстановления, лазерное испарение).

2. Конденсационные методы, или методы получения наночастиц из отдельных атомов (варианты механохимического дробления, конденсация из газовой фазы, плазмохимические методы и др.).

К первой группе методов относится получение наночастиц серебра методом химического восстановления в растворах. Наночастицы серебра в водных растворах получают путем восстановления ионов серебра с помощью глюкозы, аскорбиновой кислоты, гидразина, боргидрида натрия и других восстановителей. Реакцию восстановления проводят в различных условиях. Аналогично методу Туркевича (получения наночастиц золота), существует способ получения наноразмерного серебра. Однако, так как серебро является более активным

металлов, чем золото ($E_{\text{Ag}^+/\text{Ag}}^0 = 0,8 \text{ В}$, $E_{\text{Au}^{3+}/\text{Au}}^0 = 1,5 \text{ В}$), то синтез наночастиц серебра происходит более сложно из-за способности серебра к быстрому окислению и агрегации [5]. Для повышения устойчивости коллоидных растворов серебра наночастицы необходимо стабилизировать. В работе [6] восстановление глюкозой проводили при нагревании до $60 \text{ }^\circ\text{C}$, а в качестве катализатора используют гидроксид натрия, в результате были получены частицы размером $10\text{--}20 \text{ нм}$, $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$. В цитратном методе получения и восстановителем, и стабилизатором служит цитратанион, получаемый при растворении в воде трехзамещенной натриевой соли лимонной кислоты (1). При нагревании раствора и окислении цитрат аниона образуется ацетондикарбоновая (2) и итаконовая кислоты (3) [7]. Данные кислоты (рисунок 2) адсорбируются на поверхности частиц и контролируют их рост.

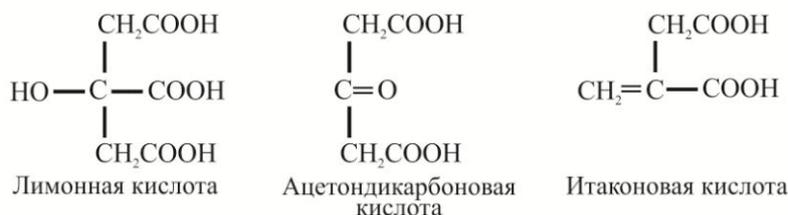


Рисунок 2 – Кислоты

Для получения наночастиц серебра большее значение имеет метод восстановления тетрагидридборатом натрия, что можно объяснить более высокой восстановительной способностью боргидрида. Наночастицы, полученные данным методом, обладают высокой стабильностью, не осаждаются и не меняют окраску (желтая окраска раствора указывает на сферическую форму наночастиц) в течение нескольких недель. Предполагается следующая схема протекания реакции [8]:



С течением времени происходит агрегация наночастиц. Для усиления агрегативной устойчивости может быть использована желатина, введение которой в значительной степени предотвращает агрегацию и снижает средний размер наночастиц (размер частиц в диапазоне от 3 до 17 нм) [9].

К конденсационным методам относится способ получения изолированных наночастиц методом осаждения из коллоидных растворов. Данные методы заключаются в прерывании химической реакции между компонентами раствора. Например, скачкообразным увеличением pH раствора в определенный момент времени, после чего система переходит из жидкого коллоидного состояния в дисперсное твердое состояние [10]. При получении антимикробных полимерных водорастворимых пленочных покрытий с наноразмерными структурами из серебра наночастицы серебра требуемого размера получают смешиванием водных растворов нитрата серебра и L-цистеина в мольном соотношении 1,25–2,00. Совмещение наночастиц серебра с поливиниловым спиртом проводится в 10–12 % по массе водном растворе поливинилового спирта при температуре $85\text{--}90 \text{ }^\circ\text{C}$ и объемном соотношении смешиваемых растворов 1:1 с получением супрамолекулярного полимера [11; 12; 13]. В 2016 г. выдан патент РФ на изобретение «Способ получения нанокристаллического порошка сульфида серебра» [14]. Авторами предложен на основе конденсационного метода простой способ получения однофазных беспримесных нанокристаллических порошков сульфида серебра с узким распределением частиц по размеру в заранее указанном диапазоне от 20 до 500 нм. Проводят осаждение из водного раствора смеси нитрата серебра и сульфида натрия в присутствии цитрата натрия при температуре $20\text{--}35 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 5–60 мин, в водном растворе исходные компоненты взяты в соотношении нитрат серебра: сульфид натрия: цитрат натрия = 1 : (0,5–10) : (0,1–2).

При радиационном облучении в растворе могут образовываться не только электроны, но и радикалы. С целью инактивации радикалов используют гасители радикалов, например, спирты. Применение радиационного восстановления описано в работе [15]. Для получения коллоидного раствора наночастиц серебра авторами предложен способ, включающий растворение в воде нитрата серебра и полимера-стабилизатора – карбоксиметилхитина, барботирование инертного газа через слой раствора и гамма-облучение раствора дозой $2\text{--}12 \text{ кГр}$ с восстановлением ионов серебра в наночастицы серебра. Процесс формирования наночастиц серебра состоит в генерировании сольватированных электронов в растворителе (воде) при действии гамма-облучения и последующем их взаимодействии с ионами серебра в растворе. Присутствие в подобных системах полимера-стабилизатора предотвращает нежелательную агломерацию и увеличение размера образующихся наночастиц серебра.

В работе [16] авторами предложен упрощенный способ получения наночастиц серебра, включающий предварительное смешение 4 % раствора нитрата серебра в этиловом спирте с 1 % раствором гидроксида натрия в этиловом спирте с образованием оксида серебра, получение аммиачного раствора оксида серебра в этиловом спирте путем пропускания газообразного аммиака до полного растворения осадка, восстановление

серебра из аммиачного раствора оксида серебра в этиловом спирте под воздействием акустической кавитации в течение 5–15 мин в присутствии этиленгликоля, диэтиленгликоля или глицерина, взятых в качестве органического растворителя. В 2015 г. запатентован способ получения наночастиц серебра без применения реагента-восстановителя, а методом экспонирования сереброборатного стекла при естественном солнечном свете или при рентгеновском облучении с образованием поверхностной пленки из наночастиц серебра и обеспечением высокого выхода продукта [17].

В работе [18] предложен способ получения наночастиц серебра в водной среде, включающий растворение стабилизаторов в дистиллированной воде, помещение в полученный раствор анода, выполненного в виде серебряной пластины, и катода – пластины из нержавеющей стали, электрохимическое растворение анода при пропускании через раствор стабилизированного постоянного тока.

В методе Кери Ли [19] роль восстановителя ионов серебра играет сульфат двухвалентного железа, а цитрат натрия стабилизирует образующиеся частицы. Реакция проходит при комнатной температуре. Рост частиц происходит по агрегатному механизму, причем, чем больше скорость перемешивания раствора, тем меньше агрегация наночастиц и тем больше монодисперсность раствора. Золи, полученные методом Кери Ли, превосходят по своим характеристикам обычные цитратные золи серебра. Недостатком метода является использование в классической схеме синтеза высоких концентраций реагентов, что приводит к необходимости проведения ряда последовательных циклов осаждения центрифугированием и редиспергирования частиц металла.

В последние годы возрос интерес к биосинтезу наночастиц серебра. В ГосНИИгенетика получают наночастицы сульфида серебра микроскопическими грибами [20]. При биосинтезе наночастиц бактериями используют штаммы рода *Rhodococcus*, *Pseudomonas*, *Fusarium*. Учеными установлено, что бактерии действуют как химический восстановитель, собирая из ионов серебра сферические наночастицы и продолжая размножаться [21; 22]. В патенте на изобретение [23] предложен способ получения композиции, содержащей коллоидное наносеребро. Он включает инкубирование пробиотических бактерий, выбранных из видов *Lactobacillus fermentum*, с водным раствором, содержащим не менее 4 мМ нитрата серебра. Композицию, содержащую коллоидное наносеребро, получают контактированием указанных бактерий при 5–45 °С с водным раствором, содержащим смесь нитрата серебра, аммиака и/или соль аммония, а также гидроксид щелочного металла.

Так же исследован процесс восстановления серебра в водных растворах с помощью «зеленых» реагентов – глюкозы, а также аскорбиновой кислоты, в отсутствие какого-либо дополнительного стабилизатора. К раствору нитрата серебра определенной концентрации (0,0001 М – 0,005 М) добавляли такой же объем восстановителя (0,001 М – 0,05 М) и доводили pH до заданного значения с помощью раствора аммиака. Полученные растворы обрабатывали в микроволновой печи в течение 10 минут при мощности 700 Вт. Микроволновое излучение обеспечивает быстрое и равномерное нагревание всего объема реакционного раствора, что приводит к однородности в условиях нуклеации и роста зародышей и к получению наночастиц наименьшего размера и одинаковой формы [24].

Другая методика получения гидрозолей серебра, основанная на восстановлении нитрата серебра, состоит в следующем. В реакционную емкость при комнатной температуре вводится буферный раствор (pH = 9,8), раствор танина, затем, при непрерывном перемешивании, со скоростью 1,3 мл/мин вводится раствор нитрата серебра. Анализ микрофотографий полученных частиц серебра показал, что размеры частиц лежат в интервале 70–150 нм для частиц, полученных из эквимольных растворов – 30–90 нм в избытке танина [25].

Методом механохимической обработки смеси нитрата серебра и ПВП при комнатной температуре возможно получение наночастиц серебра, стабилизированных макромолекулами ПВП. Для этого смесь ПВП и нитрата серебра тщательно перемешивают и измельчают в шаровой мельнице. Для удаления избытка ПВП полученный порошок суспендируют в водный раствор с последующим центрифугированием на препаративной центрифуге. После декантации водного слоя осадок высушивается в вакуум-сушильном шкафу до постоянной массы.

Один из новых способов получения наночастиц металлов заключается в высокотемпературном нанопринтинге на металлическую фольгу, в результате которого образуется отпечаток, содержащий наночастицы металлов с минимальной толщиной слоя 350 нм [22]. Наночастицы серебра вне зависимости от способа получения исследуют современными методами: методом рентгеновской дифракции (XRD), методом трансмиссионной электронной микроскопии (ТЕМ), просвечивающей электронной микроскопией, методом энергодисперсионного анализа, спектрофотометрическими методами [9; 10; 16; 23; 24].

Главным вопросом является возможность получения дисперсной системы, состоящей из наночастиц серебра, с требуемой устойчивостью во времени и к действию факторов внешней среды.

В настоящее время нанотехнологии оказывают существенное воздействие на развитие медицины: создаются новые ферменты, антитела, плазмиды, всё шире используются модификации биологических молекул и наночастиц металлов для создания на их основе новых материалов и устройств с целью ранней диагностики, прогностики и лечения социально значимых заболеваний человека [25]. Наночастицы серебра, широко используемые для получения различных материалов с антисептическими свойствами, – один из наиболее

изученных объектов нанотехнологии, но диапазон их применения еще не до конца изучен. Необходимо продолжать исследования влияния наночастиц серебра и создавать новые, усовершенствованные методы их получения [26].

Список литературы

1. Влияние дисперсного состава зольей серебра и золота на их электрохимическую активность / А. В. Коршунов [и др.] // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317, № 3. – С. 6–13.
2. Singh. Нанокompозитные гидроколлоидные адгезивы для биомедицинского применения / В. Г. Куличихин [и др.] // Российские нанотехнологии. – 2006. – Т. 1, № 1–2. – С. 170–182.
3. Бактерицидные и каталитические свойства стабильных металлических наночастиц в обратных мицеллах / Е. М. Егорова [и др.] // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2, Химия. – 2001. – Т. 42, № 5. – С. 332–338.
4. Кобаяси, Н. Введение в нанотехнологию / Н. Кобаяси. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2008. – 134 с.
5. Рыбалкина, М. Нанотехнологии для всех. Большое в малом / М. Рыбалкина. – М.: Nanotechnology News Network, 2005. – 444 с.
6. Тимошенко, В. Ю. Фундаментальные основы нанотехнологий [Электронный ресурс] / В. Ю. Тимошенко. – Режим доступа: <http://www.nano.msu.ru/education/courses/basics/materials>. – Дата доступа: 10.12.2019.
7. Wanzhong, Z. Synthesis of silver nanoparticles. Effects of concerned parameters in water/oil microemulsion / Z. Wanzhong // State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology. – 2007. – P. 17–21.
8. Комаров, С. М. Камера – обскура для нанотехнолога / С. М. Комаров // Химия и жизнь. – 2007. – № 3. – С. 32–36.
9. Кузьмина, Л. Н. Получение наночастиц серебра методом химического восстановления / Л. Н. Кузьмина // Журнал Российского химического общества имени Д. И. Менделеева. – 2007. – Т. XXX, № 8. – С. 7–12.
10. Патент РФ № 2474471. Коллоидный раствор наночастиц серебра, металл-полимерный нанокompозитный пленочный материал, способы их получения, бактерицидный состав на основе коллоидного раствора и бактерицидная пленка из металл-полимерного материала / В. А. Александрова, Л. Н. Широкова. – Оpubл. 10.02.2013; бюл. № 4.
11. Патент РФ № 2448810. Способы получения наночастиц серебра / Р. Н. Галихметов, А. Г. Мустафин. – Оpubл. 27.04.2012.
12. Патент РФ № 2547982. Способ получения наночастиц / Г. А. Сычева. – Оpubл. 10.04.2015.
13. Патент РФ № 2390344. Способ получения наночастиц серебра в водной среде / Г. Н. Крейцберг [и др.]. – Оpubл. 27.05.2010; бюл. 15.
14. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2007. – 416 с.
15. Патент РФ № 2542280. Способ получения пленок с наноструктурным серебром / О. А. Баранова, П. М. Пахомов. – Оpubл. 20.02.2015; бюл. 5.
16. Патент РФ № 2562390. Способ получения наночастиц серебра / О. А. Баранова, П. М. Пахомов, С. Д. Хижняк. – Оpubл. 20.08.2014; бюл. № 23.
17. Патент РФ № 2572421. Способ получения нанокристаллического порошка сульфида серебра / С. И. Садовников, А. А. Ремпель. – Оpubл. 10.01.2016; бюл. № 1.
18. Биосинтез наночастиц сульфида серебра микроскопическими грибами / Т. Воейкова [и др.] // Актуальная биотехнология. – 2015. – № 3 (14). – С. 51–51.
19. Mulvaney, P. Surface Chemistry of Colloidal Silver in Aqueous Solution: Observations on Chemisorption and Reactivity / P. Mulvaney, Th. Linnert, A. Henglein // The Journal of Physical Chemistry. – 1991. – Vol. 95, № 20. – P. 36–36.
20. Синтез и свойства наночастиц серебра: достижения и перспективы / Ю. А. Крутиков [и др.] // Успехи химии. – 2008. – Т. 77, № 3. – С. 242–269.
21. Патент РФ № 2460797. Способ получения композиции, содержащей коллоидные наносеребро или нанозолото / В. де Виндт, Т. Веркаутерен, В. Вестрате. – Оpubл. 10.09.2012; бюл. № 25.
22. Mekar, H. Formation of metal nanostructures by high-temperature imprinting / H. Mekar // Microsystem Technologies. – 2014. – P. 1103–1109.
23. Жилкина, В. Ю. Nanophox как инновационный прибор для работы по анализу лекарственных субстанций с наночастицами / В. Ю. Жилкина // Сб. тр. VIII Всерос. школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур». – Рязань, 2015. – Т. 3. – С. 259–262.
24. Фармация будущего: нанолечения и методы их анализа / А. И. Марахова [и др.] // Разработка и регистрация лекарственных средств. – 2015. – № 1(10). – С. 72–78.
25. Григорьев, М. Г. Использование наночастиц серебра против социально значимых заболеваний / М. Г. Григорьев, Л. Н. Бабич // Молодой ученый. – 2015. – № 9. – С. 396–401.
26. Сосенкова, Л. С. Наночастицы серебра малого размера для исследований биологических эффектов / Л. С. Сосенкова, Е. М. Егорова // Журнал физической химии. – 2011. – Т. 85, № 2. – С. 1–10.

The purpose of the work is to study methods for producing silver nanoparticles and their application.

Жернак Михаил Андреевич – студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, tegra@mail.ru.

Курьян Николай Николаевич – старший преподаватель кафедры современных технологий программирования Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, kurian90@mail.ru.

Научный руководитель – *Ануфрик Славмир Степанович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, anufriick@grsu.by.

Н. А. ЖИНКО

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ, ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Были изучены принцип работы, основные характеристики, преимущества и недостатки синхронного двигателя, а также была рассмотрена сфера применения и особенности данных двигателей. Исследован принцип запуска и режимы работы двигателей данного типа.

Синхронная машина – это электрическая машина переменного тока, частота вращения ротора которой равна частоте вращения магнитного поля в воздушном зазоре.

Как и любой другой, синхронный электродвигатель состоит из данных основных частей:

- Статор. В нём расположены обмотки. Его еще называют якорем.
- Ротор. На нём устанавливают постоянные магниты или обмотку возбуждения. Его также называют индуктором, из-за его предназначения – создавать магнитное поле.
- Вентилятор.
- Контактные кольца.
- Щётки.
- Возбудитель.

Для подачи тока в обмотку возбуждения на роторе устанавливают 2 кольца (так как возбуждение постоянным током, на одно из них подают «+», а на другое «-»). Щетки закреплены на щеткодержателе.

Таким образом, по принципу действия синхронная машина представляет собой как бы «вывернутую наизнанку» машину постоянного тока, переменный ток для обмотки якоря которой не получается с помощью коллектора, а подводится извне.

Якорь представляет собой одну или несколько обмоток переменного тока. В двигателях тока, подаваемые в якорь, создают вращающееся магнитное поле, которое сцепляется с полем индуктора, и таким образом происходит преобразование энергии. Поле якоря оказывает воздействие на поле индуктора и называется, поэтому, также полем реакции якоря. В генераторах поле реакции якоря создаётся переменными токами, индуцируемыми в обмотке якоря от индуктора.

Индуктор состоит из полюсов – электромагнитов постоянного тока или постоянных магнитов (в микромашинах).

Для уменьшения магнитного сопротивления, то есть для улучшения прохождения магнитного потока, применяются ферромагнитные сердечники ротора и статора. В основном они представляют собой шихтованную (набранную из отдельных листов) конструкцию из электротехнической стали.

Самые распространенные типы такого рода агрегатов – однофазный и трехфазный. Принцип работы синхронного электродвигателя в обоих случаях примерно одинаков. После подключения обмотки якоря к сети ротор остается неподвижным, в то время как постоянный ток поступает в обмотку возбуждения. Направление электромагнитного момента меняется дважды за время одного изменения напряжения. При значении среднего момента равно нулю, ротор под влиянием внешнего момента (механического воздействия) разгоняется до частоты, близкой по значению частоте вращения магнитного поля в зазоре, после чего двигатель переходит в синхронный режим.

Как всякая электромашина, синхронная машина может работать в режимах двигателя и генератора.

Генераторный режим.

Принцип действия синхронного генератора основан на явлении электромагнитной индукции; при вращении ротора магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, сцепляется поочередно с каждой из фаз обмотки статора, индуцируя в них ЭДС. В наиболее распространенном случае применения трёхфазной распределенной обмотки якоря в каждой из фаз, смещённых друг относительно друга на 120 градусов, индуцируется синусоидальная ЭДС. Соединяя фазы по стандартным схемам «треугольник» или «звезда», на выходе генератора получают трёхфазное напряжение, являющееся общепринятым стандартом для магистральных электросетей.

Двигательный режим.

В мощных двигателях в качестве полюсов используются электромагниты (ток на ротор подаётся через скользящий контакт щётка-кольцо), в маломощных, к примеру, в двигателях жёстких дисков – постоянные магниты. Существует обращённая конструкция двигателей, в которой якорь расположен на роторе, а индуктор – на статоре (в устаревших двигателях, а также в современных криогенных синхронных машинах, в которых в обмотках возбуждения используются сверхпроводники).

Кратко рассмотрим принцип действия такого электродвигателя – он основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора, которое обычно создается трёхфазным переменным током и постоянного магнитного поля ротора.

Принцип действия синхронного электродвигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора и постоянного магнитного поля ротора. Концепция вращающегося магнитного поля статора синхронного электродвигателя такая же, как и у трехфазного асинхронного электродвигателя. Принцип работы синхронного двигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора и постоянного магнитного поля ротора.

Магнитное поле ротора, взаимодействуя с синхронным переменным током обмоток статора, согласно закону Ампера создает крутящий момент, заставляя ротор вращаться.

Постоянные магниты, расположенные на роторе, создают постоянное магнитное поле. При синхронной скорости вращения ротора с полем статора, полюса ротора сцепляются с вращающимся магнитным полем статора. В связи с этим СД не может сам запуститься при подключении его напрямую к сети трехфазного тока (частота тока в сети 50 Гц).

Для работы синхронного двигателя с постоянными магнитами обязательно требуется система управления, например, частотный преобразователь или сервопривод. При этом существует большое количество способов управления реализуемых системами контроля. Выбор оптимального способа управления, главным образом, зависит от задачи, которая ставится перед электроприводом.

Обычно ротор располагается внутри статора электродвигателя, также существуют конструкции с внешним ротором – электродвигатели обращенного типа.

Ротор состоит из постоянных магнитов. В качестве постоянных магнитов используются материалы с высокой коэрцитивной силой.

Роторы у синхронных электродвигателей переменного тока бывают двух типов в зависимости от назначения:

1. Явнополюсные. Четко видны полюса (катушки). Используют при малых скоростях и большом числе полюсов.

2. Неявнополюсные – выглядит как круглая болванка, в прорези на которой уложены провода обмоток. Используют при больших скоростях вращения (3000, 1500 об/мин) и малом числе полюсов.

Также по конструкции ротора СДПМ делятся на:

- синхронный двигатель с поверхностной установкой постоянных магнитов
- синхронный двигатель со встроенными (инкорпорированными) магнитами. Статор состоит из корпуса и сердечника с обмоткой. Наиболее распространены конструкции с двух- и трехфазной обмоткой.

В зависимости от конструкции статора синхронный двигатель с постоянными магнитами бывает:

- с распределенной обмоткой;
- с сосредоточенной обмоткой.

Распределенной называют такую обмотку, у которой число пазов на полюс и фазу $Q = 2, 3, \dots, k$.

Сосредоточенной называют такую обмотку, у которой число пазов на полюс и фазу $Q = 1$. При этом пазы расположены равномерно по окружности статора. Две катушки, образующие обмотку, можно соединить как последовательно, так и параллельно.

Форма обратной ЭДС электродвигателя может быть:

- трапецеидальная;
- синусоидальная.

Хотя асинхронные двигатели считаются более надежными и дешевыми, их синхронные «собратья» имеют некоторые преимущества и широко применяются в различных областях промышленности. К отличительным характеристикам синхронного электродвигателя можно отнести:

- Работу при высоком значении коэффициента мощности.
- Высокий КПД по сравнению с асинхронным устройством той же мощности.
- Сохранение нагрузочной способности даже при снижении напряжения в сети.
- Неизменность частоты вращения независимо от механической нагрузки на валу.
- Экономичность.

Синхронным двигателям также присущи некоторые недостатки:

- Достаточно сложная конструкция, делающая их производство дороже.
- Необходимость источника постоянного тока (возбудителя или выпрямителя).
- Сложность пуска.
- Необходимость корректировать угловую частоту вращения путем изменения частоты питающего напряжения.

Однако в некоторых случаях использование синхронных двигателей предпочтительнее:

- Для улучшения коэффициента мощности.
- В длительных технологических процессах, где нет необходимости в частых запусках и остановках.

Таким образом, «плюсы» двигателей такого типа значительно превосходят «минусы», поэтому на данный момент они высоко востребованы.

Изучив синхронный двигатель, устройство и принцип его действия и учтя условия, в которых он будет эксплуатироваться, вы сможете быстро и с легкостью подобрать оптимально подходящий для ваших целей тип агрегата (защищенный, закрытый, открытый) и использовать его с максимальной эффективностью.

Так же к существенным недостаткам синхронного двигателя можно отнести то, что его конструкция сложнее, чем у асинхронных с КЗ-ротором, нужен возбудитель, без которого он не сможет работать. Всё это приводит к большей стоимости по сравнению с асинхронными машинами и сложностями в обслуживании и эксплуатации.

Пожалуй, на этом достоинства и недостатки синхронных электродвигателей заканчиваются.

Особенностью этого вида электрических машин является то, что его нельзя просто подключить к сети и ожидать его запуска. Кроме того, что для работы СД нужен не только источник тока возбуждения, у него и достаточно сложная схема пуска.

Запуск происходит как у асинхронного двигателя, а для создания пускового момента кроме обмотки возбуждения на роторе размещают и дополнительную короткозамкнутую обмотку «беличью клетку». Её еще называют «демпфирующей» обмоткой, потому что она повышает устойчивость при резких перегрузках.

Ток возбуждения в обмотке ротора при пуске отсутствует, а когда он разгоняется до подсинхронной скорости (на 3–5 % меньше синхронной), подаётся ток возбуждения, после чего он и ток статора совершают колебания, двигатель входит в синхронизм и выходит на рабочий режим.

Для ограничения пусковых токов мощных машин иногда уменьшают напряжение на зажимах обмоток статора, подключив последовательно автотрансформатор или резисторы.

Пока синхронная машина запускается в асинхронном режиме, к обмотке возбуждения подключаются резисторы, сопротивление которых превышает сопротивление самой обмотки в 5–10 раз. Это нужно чтобы пульсирующий магнитный поток, возникающий под действием токов, наводимых в обмотке при пуске, не замедлял разгон, а также чтобы не повредить обмотки из-за индуцируемых в ней ЭДС.

Синхронные электродвигатели (СД) не так распространены, как асинхронные с короткозамкнутым ротором. Но используются там, где нужен большой крутящий момент, и в процессе работы будут происходить частые перегрузки. Также, такой тип двигателей используются там, где нужна большая мощность, чтобы приводить в движение механизмы. Благодаря высокому коэффициенту мощности и возможности улучшать коэффициент мощности сети, это существенно снижает затраты на электроэнергию и нагрузку на линии.

Синхронные двигатели стоят дороже чем асинхронные, к тому же требуют дополнительного источника постоянного тока возбуждения – это отчасти снижает ширину области применения этого вида электрических машин. Однако, синхронные электродвигатели используют для привода механизмов, где возможны перегрузки и требуется точное поддержание стабильных оборотов.

При этом чаще всего используются в области больших мощностей – сотен киловатт и единиц мегаватт, и, при этом, пуск и остановка происходят достаточно редко, то есть машины работают круглосуточно долгое время. Такое применение обусловлено тем, что синхронные машины работают с коэффициентом мощности, приближенным к единице, и могут выдавать реактивную мощность в сеть, в результате чего улучшается коэффициент мощности сети и снижается её потребление, что важно для предприятий.

Часто синхронные генераторы используют вместо коллекторных машин для генерации постоянного тока, подключая их обмотки якоря к трёхфазным выпрямителям – на тепловозах, автомобилях, летательных аппаратах. Это сделано из-за намного большей надёжности и межремонтного ресурса синхронных машин.

Список литературы

1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.szemo.ru/press-tsentr/article/ustroystvo-i-printsip-deystviya-sinkhronnogo-dvigatelya>.
2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki>.
3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://samelectrik.ru/chto-takoe-sinxronnye-dvigateli.html>
4. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://electrono.ru/elektricheskie-mashiny-peremennogo-toka/89-sinxronnyj-dvigatel>.
5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bourabai.kz/toe/synchron.htm>.

In this article, we studied the principle of operation, the main characteristics, advantages and disadvantages of a synchronous motor, and also examined the scope and features of these motors. In addition, the principle of starting and operating modes of engines of this type was investigated.

Жинко Никита Александрович, студент физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, zhinkonik@mail.ru.

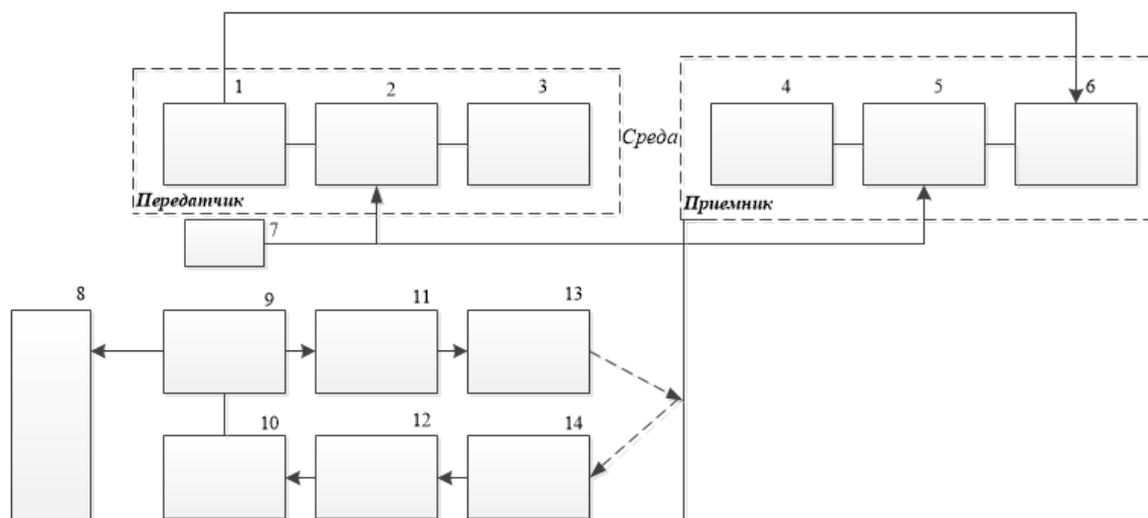
Научный руководитель – *Комар Владимир Николаевич*, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой электротехники и электроники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

К. В. ЖУРАВСКАЯ

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ МЕТОДОМ ФИГУР ЛИССАЖУ В ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ

Предложена конструкция лабораторной установки для измерения распространения скорости звука в воздухе методом фигур Лиссажу. Установка использует типовой динамический усилитель марки РАМ8403 и малошумящий микрофонный усилитель марки ГУМАХ 4466, а также изготовленный электронный измеритель расстояния.

Описываемая лабораторная установка состоит из: передатчика, приёмника и электронного измерителя расстояния. Структурная схема электрическая лабораторной установки предоставлена на рисунке 1.



- 1 – генератор; 2, 5, 11, 12 – усилители; 3 – звуковой источник; 4 – микрофон; 6 – осциллограф; 7 – источник питания;
8 – излучатель; 9 – микроконтроллер; 10 – АЦП; 13 – передатчик ультразвукового датчика расстояния;
14 – приемник передатчик ультразвукового датчика расстояния

Рисунок 1 – Схема функциональная электрическая лабораторной установки для измерения скорости звука методом фигур Лиссажу

В разработанной лабораторной установке в качестве источника сигнала частотой 20 Гц – 20 кГц используется функциональный генератор сигнала Г6-46 (1, рис. 1). Сигнал звукового генератора усиливается и поступает к источнику звука (3, рис. 1). В качестве источника звуковых волн используется электродинамический излучатель, преобразующий электрические колебания в звук определенной частоты и интенсивности. Для усиления звукового сигнала используется один канал типового усилителя РАМ8403 (2, рис. 1). РАМ8403 представляет собой усилитель D-класса, эффективность которого намного выше аналоговых (АВ-класса) усилителей. Его достоинством также является низкий коэффициент нелинейных искажений. Наличие двух каналов усиления позволяет в дальнейшем модернизировать лабораторную установку.

Акустические волны заданной частоты, создаваемые каналом передатчика, преобразуются микрофоном (4, рис. 1) канала приёмника в электрические колебания той же частоты. Далее они поступают на вход микрофонного усилителя (5, рис. 1). В качестве микрофонного усилителя используется малошумящий усилитель марки ГУМАХ 4466 со встроенной схемой автоматической регулировки усиления. Использование, в разработанной лабораторной установке данного усилителя позволило получить величину выходного напряжения с одинаковой амплитудой во всем диапазоне измеряемых частот. С выхода микрофонного усилителя сигнал уровня порядка 0,7 В поступает на вход усилителя горизонтального отклонения луча (канал-Х) осциллографа (6, рис. 1). На вход усилителя вертикального отклонения луча (канал-У) поступает начальный сигнал с генератора для дальнейшего наблюдения фигур Лиссажу.

Для измерения расстояния между передатчиком и приемником лабораторной установки (20 мм – 2000 мм) был разработан электронный измеритель расстояния. В его основе лежит микроконтроллер Atmega 328P-UP. (9, рис. 1), АЦП (10, рис. 1), двухканальный ультразвуковой излучатель HC-SR04 (13, 14, рис. 1), частота которого составляет 40 кГц, и индикатор 1602 А (8, рис. 1).

Рассмотрим принцип измерения скорости звука. Распространяющиеся звуковые волны в среде достигают микрофона с запаздыванием на время $\tau = \frac{x}{v}$. Этому времени соответствует фазовое запаздывание электрических колебаний в микрофоне и динамике равное $\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} x$. Если микрофон, начиная от места расположения динамика, перемещать вдоль воздушной полости, то фаза электрических колебаний в микрофоне будет непрерывно меняться на 2π через каждые повторяющиеся интервалы $\Delta x = \lambda$. Таким образом, идея измерения длины волны, а через нее и скорости звука, оказывается простой. Для этого необходимо фиксировать ряд последовательных положений микрофона $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots$, при которых разность фаз колебаний составляет 2π и расстояния между которыми равны λ [1].

$$X_2 - X_1 = X_3 - X_2 = X_4 - X_3 = \dots = \lambda.$$

Для этих целей служит метод наблюдения так называемых фигур Лиссажу на экране осциллографа. Основной частью осциллографа является электронно-лучевая трубка. В пространстве трубки между анодом и экраном находятся две пары управляющих пластин – X и Y. К ним подводятся исследуемые переменные напряжения. Под действием этих напряжений электронный луч может получить отклонение как в горизонтальной плоскости (X-пластины), так и в вертикальной (Y-пластины). Если переменное напряжение приложено только к одной паре пластин (X- или Y-), то на экране осциллографа высветится либо горизонтальная, либо вертикальная линии [2]. Если же к пластинам одновременно подаются переменные напряжения, то след электронного луча на экране, как результат наложения двух лучей во взаимно перпендикулярных направлениях, становится более сложным и представляет собой фигуру Лиссажу. В данном случае электрические колебания, вырабатываемые генератором, подаются на горизонтально отклоняющие пластины Y осциллографа, а преобразованные микрофоном колебания попадают на вертикально отклоняющие пластины X. Соответствующие отклонения электронного луча по осям координат X и Y считаем пропорциональными приложенным напряжениям U_x и U_y , каждое из которых можно представить в виде:

$$U_x = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1),$$

$$U_y = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2),$$

то на экране наблюдается неподвижная замкнутая кривая – эллипс (в частном случае прямая или окружность). Проведя соответствующие тригонометрические и алгебраические преобразования, получим уравнение эллипса:

$$\frac{U_y^2}{A_2^2} + \frac{U_x^2}{A_1^2} + 2 \frac{U_y U_x}{A_2 A_1} \cos k(r_2 - r_1) = \sin^2 k(r_2 - r_1)$$

В общем случае разность фаз можно определить, изменяя параметры эллипса (проекции малой и большой оси эллипса на оси координат X и Y) на экране осциллографа.

При $\varphi = 0$ и $\varphi = \pi$ уравнение эллипса преобразовывается в уравнение прямой с положительным наклоном

$$U_y = \frac{A_2}{A_1} U_x.$$

При $\varphi = \pi$ уравнение эллипса преобразовывается в уравнение прямой с отрицательным наклоном

$$U_y = -\frac{A_2}{A_1} U_x$$

Таким образом, при непрерывном изменении фазы колебаний от 0 до 2π , произойдет последовательное изменение фигуры Лиссажу: от прямой, с положительным наклоном, через ряд фигур (в форме эллипса) с переходом к прямой, с отрицательным наклоном при $\varphi = \pi$. При последующих проходах последовательности эллипсов наблюдается возврат к прямой при $\varphi = 2\pi$. Наиболее удобно фиксировать форму фигуры в виде прямой, когда фазовый сдвиг кратен π . При этом переход от прямой при $\varphi = 0$ к прямой при $\varphi = \pi$ соответствует перемещению микрофона в лабораторной установке $\Delta x = \frac{\lambda}{2}$. Таким образом, отмечая ряд последовательных положений микрофона, при которых на экране осциллографа образуется прямая положительного и отрицательного наклонов проводятся многократные измерения длины волны $\lambda_i = 2\Delta x_i = 2(x_i - x_{i-1})$ [3].

Список литературы

1. E-lib.kemtip.ru [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://e-lib.kemtip.ru/uploads/22/fiz151>. – Дата доступа: 20.10.2019.

2. Справочник по радиоэлектронным устройствам. В 2 т. / под ред. Д. П. Линде. – М.: Энергия, 1978. – 328 с.

3. Portal.tpu.ru [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://portal.tpu.ru:7777/departments/kafedra/tief/method_work/method_work2/lab3/LabsOscill/ModK-04. – Дата доступа: 15.09.2019.

In this article is described the laboratory system for measuring of the speed of sound in air by the Lissajous figures method. The system uses a typical dynamic amplifier PAM8403 and a low-noise microphone amplifier GYMAX 4466, and also author-made electronic distance meter.

Журавская Карина Валерьевна, магистрант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, sa451giu32@mail.ru.

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, german@grsu.by.

УДК 628.97

В. И. ЗАЛОГА

РЕКОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ УЧАСТКА № 2 ЦЕХА АММИАК-3 ПРЕДПРИЯТИЯ ОАО «ГРОДНО АЗОТ»

Произведен расчёт осветительного прибора участка № 2 методом коэффициента использования светового потока (далее КИСП).

Выбранный метод расчёта освещения (КИСП) включает в себя два этапа:

- светотехнический расчёт, который подразумевает под собой выбор марки светильника, определение количества рядов светильников и количество светильников в ряду;
- расчёт осветительной сети, который подразумевает расчёт и выбор питающего и отходящего провода и кабеля, выбор автоматических выключателей и щита освещения.

В конце расчётов будет приведена план-схема освещения нашего участка. В этой схеме будут отображены все элементы осветительной сети, которые мы выбрали в ходе наших расчётов.

На участке № 2, как и во всём цеху преимущественно применяются лампы типа: ДРЛ мощностью 125 и 250 Вт; ДРВ мощностью 160 и 250 Вт; ДНаТ мощностью 70 и 150 Вт, кроме того применяются люминесцентные лампы и лампочки накаливания. На рассматриваемом участке не агрессивные климатические условия, поэтому есть возможность установки светодиодных светильников.

Для того чтобы произвести светотехнический расчет электрического освещения и выбрать наиболее оптимальный светильник необходимо знать размеры помещения и нормируемую освещённость. В нашем случае размеры помещения: $A \times B \times H = 60 \times 24 \times 9$ м., а его освещённость $E_n = 200$ лк.

Перед тем как начать расчёт необходимо определить, какого типа светильник мы будем использовать на участке № 2 в конечном итоге.

Таблица 1 – Выбор светильников

Помещение	E_n , лк	Источник света	Примечание
Главное	200	СД	Высока светоотдача, большой срок службы до 100 000 часов

Расчетная высота от условной рабочей поверхности до светильника:

$$H_p = H - h_c - h_p, \quad (1)$$

где H – высота помещения, м;

h_c – расстояние от светильника до перекрытия, м (принимается $0 \div 1,5$ м);

h_p – высота расчетной поверхности над полом, м (если известна, принимается высота условной рабочей поверхности 0,8 м).

Расстояние между соседними светильниками в ряду или рядами светильников:

$$L = H_p \cdot (0,8 \div 1,1), \quad (2)$$

где $0,8 \div 1,1$ – значения обеспечивающие равномерность распределения освещённости, зависящие от кривой силы света, выбираемой из [1].

Расстояние от крайних светильников или рядов светильников до стены:

$$l = (0,3 \div 0,5) \cdot L, \quad (3)$$

где $0,3 \div 0,5$ – значения, зависящие от наличия вблизи стен рабочих мест [1].

Число рядов светильников:

$$R = \frac{B - 2 \cdot l}{L} + 1, \quad (4)$$

где B – ширина помещения, м. Число светильников в ряду:

$$N_R = \frac{A - 2 \cdot l}{L} + 1, \quad (5)$$

где A – длина помещения, м. Расстояние между рядами светильников:

$$L_B = \frac{B - 2 \cdot l}{R - 1} \quad (6)$$

Расстояние между центрами светильников в ряду:

$$L_A = \frac{A - 2 \cdot l}{N_R - 1} \quad (7)$$

Для прямоугольных помещений должно выполняться условие:

$$1 \leq \frac{L_A}{L_B} \leq 1,5 \quad (8)$$

Общее число светильников:

$$N = R \cdot N_R \quad (9)$$

После определения количества светильников и рядов производится выбор осветительного прибора, который осуществляется следующим образом.

Индекс помещения:

$$i_n = \frac{A \cdot B}{H_p \cdot (A + B)} \quad (10)$$

Пользуясь таблицей 8.1.6 [1], определяется коэффициент использования светового потока методом линейных интерполяций.

После определения коэффициента использования светового потока производится расчет светового потока.

Расчетное значение светового потока одной лампы в каждом светильнике:

$$\Phi_p = \frac{E_n \cdot K_z \cdot F \cdot z}{N \cdot \eta_{oy}} \quad (11)$$

где E_n – нормируемая освещенность помещения, лк; K_z – коэффициент запаса; F – освещаемая площадь, м²; z – отношение средней освещенности к минимальной; η_{oy} – коэффициент использования светового потока.

После определения расчетного значения светового потока по справочным данным выбирается осветительный прибор и производится проверка по условию:

$$-10\% < \Delta < +20\%, \quad (12)$$

где Δ – отношение расчетного светового потока к световому потоку лампы, %.

Отношение расчетного светового потока к световому потоку лампы:

$$\Delta = \frac{\Phi_{\lambda} - \Phi_p}{\Phi_{\lambda}} \cdot 100, \quad (13)$$

где Φ_{λ} – световой поток выбранной лампы, лм.

Если в конце расчета условие выполняется, значит, осветительный прибор выбран верно, если условие не выполняется, то принимается лампа с ближайшим значением светового потока, а далее корректируется число светильников в помещении и осуществляется повторный расчет освещения.

Приведем пример расчета освещения для главного помещения участка № 2, цеха Аммиак-3:

По формуле 1 определим расчетную высоту от условной рабочей поверхности до светильника:

$$H_p = 9 - 0,3 - 0,8 = 7,9 \text{ м.}$$

По формуле 2 определим расстояние между соседними светильниками в ряду или рядами светильников:

$$L = 7,9 \cdot (0,8 \div 1,1) = 6,3 \div 8,69 \text{ м, принимаем } L = 6,5 \text{ м.}$$

По формуле 3 определяем расстояние от крайних светильников или рядов светильников до стены:

$$l = (0,3 \div 0,5) \cdot 6,5 = 2,4 \div 4 \text{ м, принимаем } l = 4 \text{ м.}$$

По формуле 4 определяем число рядов светильников:

$$R = \frac{24 - 2 \cdot 4}{6,5} + 1 = 4.$$

По формуле 5 определяем число светильников в ряду:

$$N_R = \frac{60 - 2 \cdot 4}{6,5} + 1 = 9.$$

По формуле 6 определяем расстояние между рядами светильников:

$$L_B = \frac{24 - 2 \cdot 4}{4 - 1} = 5,3 \text{ м.}$$

По формуле 7 определяем расстояние между центрами светильников:

$$L_A = \frac{60 - 2 \cdot 4}{9 - 1} = 6,5 \text{ м.}$$

По условию 8 проверяем правильность определения всех расстояний:

$$\frac{L_A}{L_B} = \frac{6,5}{5,3} = 1,22 \quad 1 \leq 1,22 \leq 1,5$$

Условие выполняется, соответственно расстояние между центрами светильников и расстояние между рядами светильников, рассчитаны верно.

По формуле 9 определяем общее число светильников:

$$N = 4 \cdot 9 = 36 \text{ шт.}$$

По формуле 10 определяем индекс помещения:

$$i_n = \frac{60 \cdot 24}{7,9 \cdot (60 + 24)} = 2,17.$$

По таблице 8.1.б [1] выбираем значения, необходимые для определения коэффициента использования светового потока.

При выборе значений для расчета коэффициента использования светового потока используем коэффициенты отражения помещения: потолка, стен, рабочей поверхности, выбранные по таблице 8.2 [1] и рассчитанный индекс помещения.

Определяем коэффициент использования светового потока:

$$\eta_{oy} = 92 + \frac{2,17 - 2}{3 - 2} \cdot (96 - 92) = 92,7\%.$$

По формуле 11 определяем расчетное значение светового потока:

$$\Phi_p = \frac{200 \cdot 1,6 \cdot 1440 \cdot 1,15}{36 \cdot 0,927} = 15\,879 \text{ лм.}$$

Из [2] выбираем ближайший по значению светового потока светодиодный светильник марки: SV-GWR-145 с $\Phi_1 = 18\,400 \text{ лм}$ и степенью защиты: IP66.

По условию 12 произведем проверку на правильность выбранного светильника. Для этого по формуле 13 определим отношение расчетного светового потока к световому потоку лампы:

$$\Delta = \frac{18400 - 15879}{18400} \cdot 100 = 13,7\%.$$

Подставим полученный результат в условие 12: $-10\% < 13,7\% < +20\%$.

Условие выполняется, соответственно светильник выбран верно. Полученные результаты сводим в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты светотехнического расчёта электрического освещения

Помещение	H_p , м	Δ , %	$\frac{N_R}{n}$	Φ_p , лм	Φ_{Σ} , лм	P_{Σ} , Вт	ОП
Главное	7,9	13,7	9/1	15 879	18 400	145	SV-GWR-145

Исходя из произведенных выше расчётов, можно сказать что реконструкция системы освещения на участке № 2 цеха Аммиак-3 удалась. Мы произвели замену старых светильников на новые светодиодные.

Список литературы

1. Козловская, В. Б. Электрическое освещение / В. Б. Козловская, В. Н. Радкевич. – Минск : Высш. шк., 2007.
2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.polarlight.by/index.php?route=product/product&product_id=194.

This article calculates the lighting system of plot No. 2 of the ammonia-3 workshop using the light flux coefficient method.

Залогов Владислав Иосифович, студент физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, v.zaloga@mail.ru.

Научный руководитель – *Комар Владимир Николаевич*, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой электротехники и электроники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, v.komar@grsu.by.

УДК 625.87:621.793

А. И. ЗАНЬКО, Н. В. ЛЕОНОВИЧ

РАСЧЁТ ГАЗОВОГО ПОТОКА В УСТАНОВКЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ

Выполнен расчет газового потока, проходящего через газораспределитель кольцевой формы, в реакторе для осаждения из парогазовой фазы при давлении в диапазоне 10^{-2} – 10^2 Па. Установлены геометрические параметры газораспределителя, обеспечивающие равномерное поступление потока рабочего газа в камеру осаждения.

При производстве интегральных микросхем и полупроводниковых приборов одним из основных типов функциональных слоев являются диэлектрические пленки. Такие слои используются как изолятор, планаризации, пассивации поверхности, в качестве маски и жертвенных слоев. Что бы диэлектрические слои в полной мере могли выполнять вышеуказанные функции используют химическое осаждение из парогазовой фазы CVD (chemical vacuum deposition – химическое осаждение из парогазовой фазы). Разновидностью такого метода является метод плазмохимического осаждения из газовой фазы PE-CVD [1; 2]. В реактор с источником плазмы и подложкодержателем инжектируются рабочие реактивные газы, состав и процентное отношение газов устанавливается исходя из поставленной задачи. Реакции проходят в низком среднем вакууме порядка 10^2 – 10^{-2} Па.

Для получения диэлектрических слоев (SiO_2 , Si_3N_4 , $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$ и др.) с высоким качеством и равномерностью на пластинах большого диаметра необходима газораспределительная система с равномерной подачей реактивных газов в реактор. Спроектированный нами реактор имеет цилиндрическую форму и своей осью расположен вертикально, в который помещен планарный источник индуктивно-связной плазмы и подложкодержатель, откачка осуществляется за подложкодержателем. Рассматриваемый нами газораспределитель имеет форму кольца с восьмью отверстиями, равномерно расположенными по кольцу. После регулятора расхода газа идет газовая трубка, которая разделяется на два газовых трубопровода, которые соединяются в противоположных относительно оси местах с газораспределителем. Создается распределитель типа 1/2/8. При использовании отверстия одинакового размера, длина газовой магистрали до четырех из восьми отверстий получается короче, в этом случае будут создаваться неравномерные потоки. Газовые потоки, выходящие в объем реактора, можно скомпенсировать различным размером выходных отверстий газораспределителя.

При пониженных давлениях, при которых идет плазмохимическое осаждение диэлектриков, средняя длина свободного пробега молекул увеличивается пропорционально снижению давления. В таких условиях сплошность среды, как при нормальном давлении, нарушается. Длина свободного пробега молекул становится соизмерима с размером потока, что сказывается на законах газовой динамики. Для оценки характера потока в разреженных средах используется безразмерное отношение, называемое числом Кнудсена:

$$Kn = \frac{\lambda}{d},$$

где λ – длина свободного пробега молекул, d – размер потока.

Для расчета длины свободного пробега используем формулу:

$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi \sigma p},$$

где k_B – константа Больцмана ($1,3805 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), T – температура в К, σ – диаметр молекул газа в метрах, p – давление в Па.

При числах Кнудсена ($Kn < 0,01$) газ ведет себя как сплошная среда, режим ламинарного потока, и для расчета можно использовать уравнения Навье – Стокса. В диапазоне чисел Кнудсена $0,01 < Kn < 0,1$ используются уравнения Навье – Стокса, но с условиями течения газа со скольжением на поверхности твердых тел. С увеличением числа Кнудсена до 1 возникает поток, при котором следует учитывать столкновения молекул между собой и со стенками реактора. При больших значениях числа Кнудсена ($Kn > 1$) возникает режим свободного молекулярного потока, учитывается только взаимодействие молекул только со стенками реактора, можно решить, используя метод прямого статического моделирования Монте-Карло. В реактор рабочее вещество поступает с газом носителем аргоном, во многих процессах осаждения аргон составляет значительную долю от общего расхода газов, для упрощения в расчетах будут использоваться параметры этого газа. Для газораспределителя с внутренним диаметром 4 мм рассчитаем числа Кнудсена в зависимости от давления (рисунок 1).

При давлениях ниже одного паскаля в газораспределителе газовый поток можно рассчитывать, как режим свободного молекулярного потока, в диапазонах выше 1 Па до 100 Па потоки газа можно рассматривать как переходной и поток со скольжением. В расчетах потока газа будем использовать программный комплекс *Comsol Multiphysics*, в котором имеются модули для решения каждого из рассмотренных режимов *Laminar Flow* (ламинарный поток), *Slip Flow* (поток со скольжением), *Transitional Flow* (переходной поток), *Free Molecular Flow* (свободный молекулярный поток).

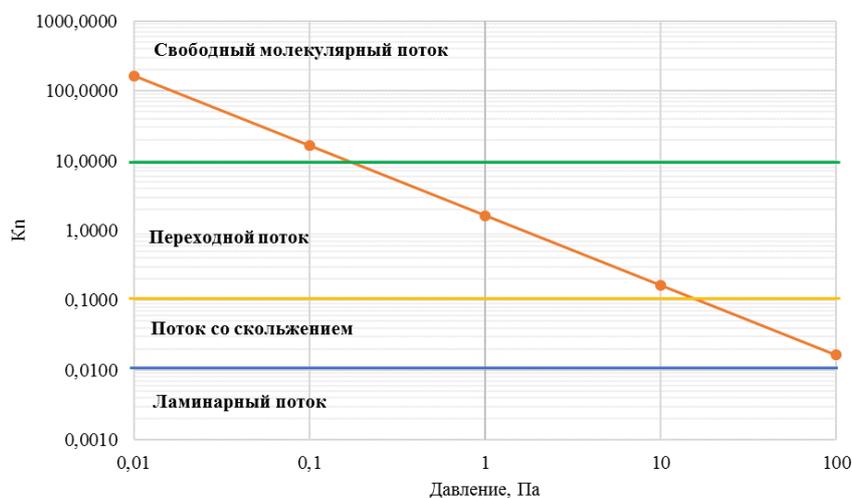


Рисунок 1 – График значений числа Кнудсена в газораспределителе в зависимости от давления в камере

Из рисунка 1 следует, что ламинарный поток возникает при давлениях более 100 Па. Граничными условиями расчета определяются установлением расхода аргона $100 \text{ см}^3/\text{мин}$, температура 273 К, давление в области расчета и на выходных отверстиях в диапазоне 0,01–100 Па. Для оценки равномерного распределения потока введем коэффициент Kp , который будем рассчитывать, как отношение давлений выпускных отверстий газораспределителя. Если значения Kp стремятся к единице, то потоки сбалансированы. При использовании модуля *Transitional Flow* из-за сложности используемых уравнений в модели не удалось добиться сходимости решения с удовлетворительной погрешностью, для расчета режима переходного потока требуются большие расчетные мощности. В связи с этим режим переходного потока будем рассматривать как средние значения давлений при свободно молекулярном режиме и режиме со скольжением. Диаметр четырех выходных отверстий, к которым была более длинная траектория газового потока составлял 1 мм, диаметры остальных

четырёх отверстий изменялись. Зависимость коэффициента равномерности при различных конфигурациях выходных отверстий, представлена на рисунке 2.

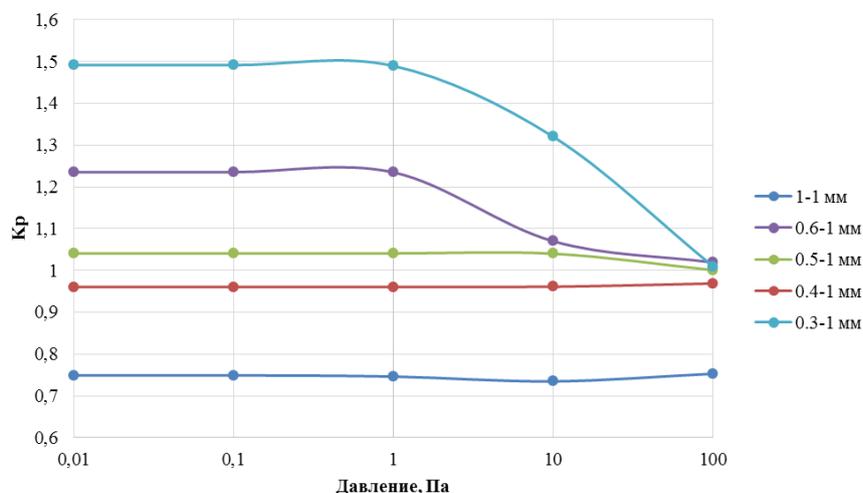


Рисунок 2 – График зависимость коэффициента равномерности потока в зоне плазмаобразования от давления при разной конфигурации выходных отверстий газораспределителя

Исходя из результатов расчетных исследований видно, что поток в камеру выравнивается на всем диапазоне расчетов при диаметрах отверстий газораспределителя 0,4–0,5 мм. Как показали расчеты равномерность потока обеспечивается и при других диаметрах отверстий при соблюдении отношения размера отверстий близких к двум. Представленный подход позволил выполнить качественную и количественную оценку газораспределения в цилиндрическом реакторе плазмохимического осаждения диэлектриков на основе кремния.

Список литературы

1. Boogaard, A. Deposition of High-Quality SiO₂ Insulating Films at Low Temperatures by means of Remote PECVD / A. Boogaard, R. Roesthuis. – 2008. – С. 452–456.
2. Mackenzie, K. D. Inductively-coupled plasma deposition of low temperature silicon dioxide and silicon nitride films for III-V applications / K. D. Mackenzie, J. W. Lee, D. Johnson // Electrochemical Society, Pennington, NJ. – 1999. – № 99 (4). – С. 1–12.
3. Абрамович, Г. Н. Прикладная электроника / Г. Н. Абрамович. – М. : Наука, 1991. – Ч. 2. – С. 132–134.

The calculation of the gas flow passing through the ring-shaped gas distributor in the reactor for deposition from the steam-gas phase at a pressure in the range of 10^{-2} – 10^2 PA is performed. The established geometrical parameters of the gas distributor ensure uniform distribution of the working gas flow into the deposition chamber.

Занько Андрей Иванович, аспирант факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, zanko.andrei@inbox.ru.

Леонович Никита Викторович, магистрант факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, nick.xz@mail.ru.

Научный руководитель – *Котов Дмитрий Анатольевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, kotov@bsuir.by.

УДК 681.326.7

Р. Р. КОРЕННОЙ, И. П. БЕЛОВ, А. С. ЛОТАШИНСКИЙ

**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА СЕМЕЙСТВА STM32,
ИСПОЛЬЗУЕМОГО В ШЕСТИКАНАЛЬНОМ ИЗМЕРИТЕЛЕ ДАВЛЕНИЯ
ДЛЯ НАСТРОЙКИ ДВС**

Представлены результаты разработки программного обеспечения микроконтроллера семейства STM32, используемого в шестиканальном измерителе давления для настройки ДВС.

Для увеличения степени автоматизации ремонта и диагностики автомобилей проектной командой было принято решение о разработке устройства предназначенного для замены манометров, используемых при работе с двигателями внутреннего сгорания. Замена классического манометра позволит упростить ремонтно-диагностические работы, а возможность подключения к различным устройствам посредством беспроводного соединения, делает данное устройство совместимым с компьютерными системами.

В статье представлены результаты разработки программного обеспечения для микроконтроллера семейства STM32, использованного в шестиканальном измерителе давления для настройки двигателей внутреннего сгорания.

Для реализации устройства управляющим элементом был выбран микроконтроллер STM32F103C8T. Данный микроконтроллер имеет аппаратную реализацию интерфейсов I2C и UART, а также имеет достаточную вычислительную мощность [1]. Программное обеспечение микроконтроллера должно выполнять следующие задачи:

- снятие данных с датчиков;
- преобразование полученных значений в действительные значения давлений;
- передача значения на внешнее устройство посредством Bluetooth.

В качестве измерителя давления были выбраны датчики BMP180 с диапазоном измеряемого давления от 300 Па до 110 МПа. Особенностью используемых датчиков является использование индивидуальных калибровочных коэффициентов, что приводит к необходимости инициализации данных и сохранения данных коэффициентов для получения необходимых значений.

Вся работа с датчиками происходит через интерфейс I2C. Данный датчик имеет три режима точности измерения, причём чем выше точность, тем больше время, затрачиваемое на считывание показаний, однако ввиду незначительных требований к скорости измерения в предложенной системе была выбрана сама высокая точность. Так как калибровочные коэффициенты являются неизменными, они записываются в память микроконтроллера при включении устройства, что избавляет от необходимости постоянного к ним обращения со стороны микроконтроллера [2].

Так как датчики имеют одинаковые адреса, в устройстве используется шинный расширитель, также работающий по данному интерфейсу. Исходя из параметров схемы был выбран восьмиканальный мультиплексор TCA9548A. Перед каждым считыванием показания с выбранного датчика необходимо произвести переключение канала мультиплексора [3]. После получения значений, они передаются на внешние устройства при помощи модуля HC-05 использующего в своей работе интерфейс UART [4].

В качестве среды разработки было использовано специализированное ПО:

- CubeMX, позволяющее генерировать базовые модули кода для установки состояния микроконтроллера и подключения необходимых портов, задействованных в работе устройства. Сгенерированный данным программным обеспечением код упрощает работу с регистрами специального назначения, позволяя управлять режимом работы различных блоков микроконтроллера без прямого взаимодействия с ними со стороны разработчика.

- Atollic TrueStudio, позволяющее писать код программы с использованием библиотек HAL.

Данная среда разработки позволяет разработчику использовать язык C и не прибегать к прямому взаимодействию с регистрами микроконтроллера, что ускоряет разработку, а также уменьшает вероятность ошибки в программе.

Основным недостатком использования данного ПО является низкая оптимизация вычислительной системы, однако в рамках поставленной задачи этот недостаток не является критическим, так как скорость работы вычислительной системы в данном случае является достаточной для выполнения поставленной перед ней задачи.

Исходя из выбранной элементной базы, а также из соображений удобства использования в дальнейшем необходимо дополнить основной алгоритм работы некоторым дополнительным функционалом:

- возможность вывода числовых значений давления на LCD дисплей;
- вывод информации о заряде батареи устройства;
- отключение Bluetooth-модуля при длительном отсутствии подключения внешнего устройства в связи с его высоким энергопотреблением в режиме ожидания, а также его включение по нажатию кнопки при необходимости возобновления работы с внешним устройством;

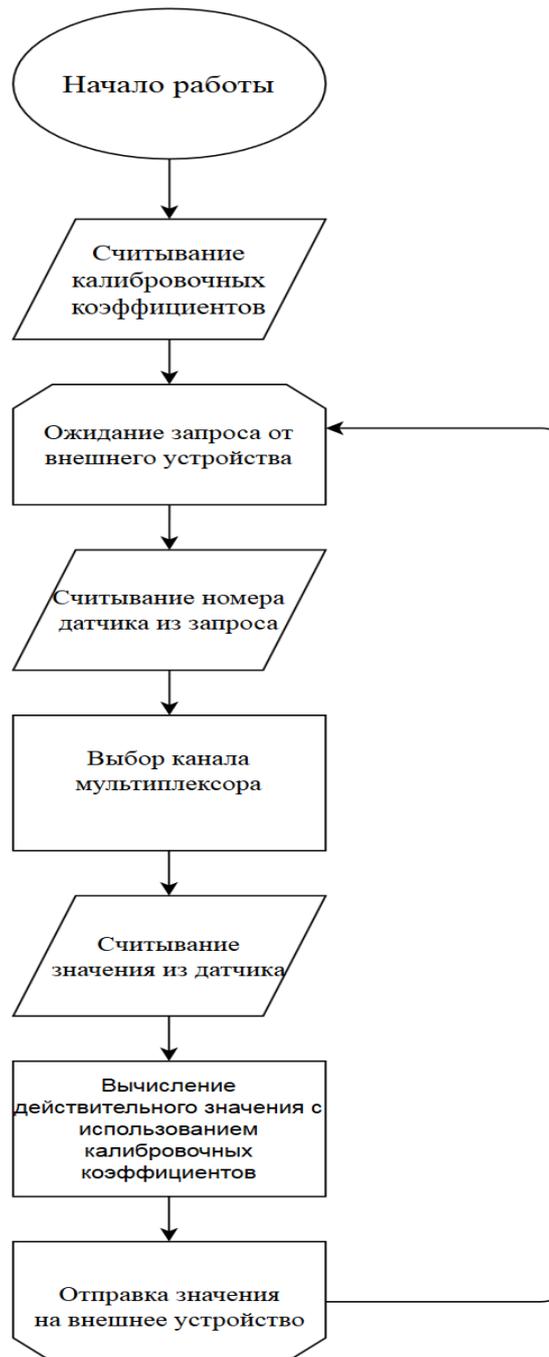


Рисунок 1 – Общий алгоритм работы устройства

При активации устройства происходит инициализация необходимых для работы портов. После активации микроконтроллер производит опрос датчиков, считывая калибровочные коэффициенты и помещая их в свою внутреннюю память. Для получения данных о давлении внешнему устройству необходимо подать запрос, содержащий в себе номер необходимого датчика. Микроконтроллер считывает данный номер и подаёт запрос с номером необходимого измерительного канала на мультиплексор. После переключения мультиплексора микроконтроллер считывает показания давления из датчика и обрабатывает их, используя хранящиеся в памяти калибровочные коэффициенты. Обработанное значение отправляется на внешнее устройство и происходит ожидание следующего запроса. При использовании встроенного дисплея микроконтроллер будет сам генерировать запросы на получение значений, и преобразовав их в символы отправлять их для отображения.

Список литературы

1. stm32f103x8 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/CD00161566.pdf>. – Дата доступа: 30.10.2019.
2. BST-BMP180-DS000-09 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf>. – Дата доступа: 30.10.2019.
3. TCA9548A Low-Voltage 8-Channel I²C SwitchwithReset [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tca9548a.pdf>. – Дата доступа: 17.11.2019.
4. HC-05 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.electronicstudio.com/docs/istd016A.pdf>. – Дата доступа: 30.10.2019.

The results of software development of a six channel pressure meter for setting up internal combustion engines based on a microcontroller of the STM32 family are presented. The algorithm of operation of a six-channel pressure meter is given.

Коренной Ростислав Русланович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, korenij_gr@grsu.by.

Белов Иван Павлович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, belov_ip@grsu.by.

Лоташинский Александр Сергеевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, lotashinsky_as@grsu.by.

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, german@grsu.by

УДК 532.13

А. Т. КУПЧЕВСКИЙ, Я. Д. КОБЫЛЯНЕЦ

ТЕРМОСТАТИРОВАНИЕ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ВЯЗКОСТИ

Разработана схема автоматизированной системы термостабилизации при измерении вязкости.

При проведение физико-химических измерений большое влияние на точность измерений имеют внешние факторы, в частности, температура.

Очень важно поддержание стабильной температуры, например, при измерении вязкости жидкости. В жидкостях молекулы расположены гораздо ближе друг к другу, чем в газах, и вязкость вызывается силами молекулярного сцепления. Эти силы с увеличением температуры уменьшаются, поэтому вязкость падает. То есть при повышении температуры вязкость жидкости уменьшается и наоборот [1]:

$$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{E}{k(T + T_0)}\right) \quad (1)$$

где η – вязкость,

E – энергия,

T – температура.

Кроме того, используются эмпирические зависимости. Для минеральных масел с вязкостью > 80 сСт при температурах от 30 до 150 °С пользуются выражением [2]:

$$v_t = v_{50} \left(\frac{50}{t}\right)^n \quad (2)$$

где v_t и v_{50} – кинематические коэффициенты вязкости при заданной температуре t и температуре 500 °С в сСт.

В настоящей работе создана схема автоматизированной системы [3; 4] термостабилизации при измерении вязкости (рисунк 1).



ДТ – датчики температуры воздуха, ЭП – элемент Пельтье, ДУ – датчик уровня жидкости в чаше вискозиметра, ВВ – воздушный вентилятор

Рисунок 1 – Блок-схема системы термостабилизации

Систему терморегулирования условно можно разделить на две части: система поддержания заданной температуры воздушной среды и система терморегулирования исследуемой жидкости.

Система регулирования воздушной среды состоит из термоизолированного пространства измерительной зоны, терморегулятора, и датчиков измерения температуры. Термоизолированное пространство представляет собой кожух из теплоизолирующих материалов. А терморегулятор – вентилятор с контролируемой температурой подачи воздуха, для поддержания необходимой температуры.

Система терморегулирования жидкости в свою очередь содержит сосуд подготовки, в котором находятся датчики температуры и мешалка для равномерного теплообмена между всеми слоя жидкости, температура регулируется в сосуде подготовки элементом Пельтье.

Датчик уровня необходим для точного дозирования, при помощи крана дозатора, необходимого объема подготовленной жидкости. После прохождения через измерительное устройство жидкость попадает в сосуд слива.

Управление всеми процессами обеих систем осуществляется при помощи блока управления.

Список литературы

1. Фогельсон, Р. Л. Температурная зависимость вязкости / Р. Л. Фогельсон, Е. Р. Лихачев // Журнал технической физики. – 2001. – Т. 71, вып. 8.
2. Зависимость вязкости от температуры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://einsteins.ru/subjects/gidravlika/theory-gidravlika/zavisimost-vyazkosti>
3. Малафеев, С. И. Системы автоматического управления / С. И. Малафеев, А. А. Малафеева. – Владимир : ВлГУ, 1998.
4. Ивель, В. П. Линейные системы автоматического управления. Курс лекций / В. П. Ивель, Ю. В. Герасимова. – Петропавловск : СКГУ им. М. Козыбаева, 2006.

At present, when conducting physico-chemical measurements, external factors play a significant role in the accuracy of measurements. In this paper, we consider a diagram of a thermal stabilization device for measuring viscosity.

Купчевский Артур Тадеушевич, магистрант 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, Arturkupchevskii@mail.ru.

Кобылянец Ярослав Дмитриевич, магистрант 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, lomidolomger1@gmail.com.

Научный руководитель – *Василюк Геннадий Тимофеевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, vasilyuk@grsu.by.

УДК 535.222

А. В. ЛАНЕВСКИЙ

СОЗДАНИЕ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ СВЕТА

Предложен вариант создания лабораторной установки для измерения скорости света с использованием амплитудно-модулированного лазерного излучения, позволяющей проводить измерения с достаточной для учебных целей точностью.

Скорость света – это одна из фундаментальных физических постоянных, которая определяет не только верхний предел скорости движения объектов с массой и распространения взаимодействий, но и геометрию пространства-времени. Современные методы измерения скорости света имеют довольно высокую точность, но зачастую лабораторные установки имеют очень большую стоимость.

Целью данной работы является создание электронной части лабораторной установки для измерения скорости света с использованием амплитудно-модулированного лазерного излучения.

Проанализировав существующие методы измерения скорости света, было принято решение о создании лабораторной установки с применением оптопары (лазерный диод – фотодиод) [1]. В ходе эксперимента было определено, что когерентное излучение лазерного диода может быть модулировано по амплитуде с частотой до 50 МГц.

Лабораторная установка состоит из:

- 1) лазерного передатчика, представленного лазерным диодом;
- 2) фотодиодного приемника, состоящего из PIN-фотодиода BPW34 (Vishay);
- 3) устройства сопряжения;
- 4) генератора сигналов специальной формы Г6-27;
- 5) двухлучевого осциллографа С1-75.

Технические характеристики генератора и осциллографа, которые предложены для использования в лабораторной установке, в полной мере удовлетворяют поставленной задаче.

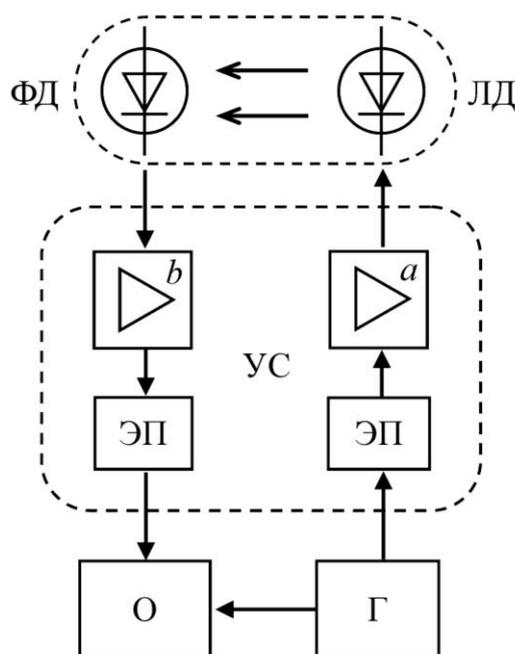
Работа установки осуществляется следующим образом. Высокочастотный сигнал с генератора Г через эмиттерный повторитель ЭП поступает на высокочастотный усилитель мощности *a*. Высокочастотный сигнал (30–50 МГц), усиленный высокочастотным усилителем мощности *a*, поступает на лазерный диод ЛД. Этот сигнал является амплитудно-модулирующим для лазерного диода. С фотодиода сигнал лазерного диода через входной усилитель канала приема *b* поступает на эмиттерный повторитель ЭП и далее на канал Б двухлучевого осциллографа О. На канал А двухлучевого осциллографа О подается сигнал с генератора Г (рисунок 1).

Использование каскадных широкополосных усилителей с дроссельной нагрузкой на многоэмиттерных транзисторах позволяет значительно упростить схему усилителя и дает возможность получить высокий коэффициент усиления. Данный усилитель имеет коэффициент усиления по мощности до 16 дБ в диапазоне частот от 3 до 150 МГц. Начальный ток (8–90 мА) устанавливают подбором резисторов.

Входной усилитель канала приема сделан на базе селектора каналов СК-Д-24. Состоит из двухкаскадного усилителя, работающего в полосе частот от 50 кГц до 170 МГц при неравномерности АЧХ ± 3 %. Усилитель выполнен на двух транзисторах, связь между каскадами непосредственная, нагрузкой первого каскада служит корректирующий дроссель с резистором. Первый усилительный каскад на биполярном транзисторе КТ355 собран по схеме с общим эмиттером, а второй каскад на транзисторе КТ355 представляет собой эмиттерный повторитель, который обеспечивает низкоомный выход усилителя. Частотозависимая отрицательная обратная связь позволяет формировать достаточно равномерную частотную характеристику. При напряжении питания

+5 В усилитель потребляет 11 мА. Доработка блока состоит в следующем: в первом каскаде убраны входные и выходное селективные цепи, каскад нагружен дросселем и резистором 5,7 кОм; транзисторы КТ 368 заменены на КТ 355; второй каскад СК-Д-24 переделан в режим эмиттерного повторителя; все цепи частотной коррекции данного блока удалены.

При включении установки модулированный сигнал с генератора Г, частотой 30–50 МГц, поступает на канал А двухлучевого осциллографа О и устройство сопряжения УС. С устройства сопряжения сигнал поступает на лазерный диод ЛД. С лазерного диода оптический амплитудно-модулированный сигнал поступает на фотодиод, с которого идет сигнал на устройство сопряжения и далее на канал Б двухлучевого осциллографа. На экране двухлучевого осциллографа отображаются два сигнала, с канала А (от генератора Г) и с канала Б (с устройства сопряжения УС). При совмещении сигналов по горизонтали (для удобства измерения) можно определить задержку, с которой поступает сигнал на канал Б. Задержку между сигналами можно изменять, варьируя расстояние между лазерным диодом ЛД и фотодиодом ФД. Временная задержка между поступающими на каналы осциллографа сигналами позволяет вычислить скорость распространения света в той среде, которая находится между излучателем амплитудно-модулированного излучения и его приемником.



ЛД – лазерный диод; ФД – фотодиод; УС – устройство сопряжения
(*a* – высокочастотный усилитель мощности; *b* – входной усилитель канала приема;
ЭП – эмиттерный повторитель); Г – генератор; О – двухлучевой осциллограф

Рисунок 1 – Функциональная электрическая схема лабораторной установки

Список литературы

1. Carlson J. E. Speed of light measurement with laser pointer / J. E. Carlson // The Physics Teacher. – 1996. – Vol. 34. – P. 176–177.

A method to create a laboratory setup for measuring the speed of light using amplitude-modulated laser radiation has been proposed. This method allows measurements to be made with accuracy sufficient for educational purpose.

Ланевский Алексей Владимирович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, lanewski5@mail.ru.

Научный руководитель – *Лавыш Андрей Валентинович*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, andrewlavysh@mail.ru.

А. О. ЛАРИН

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАГНИТНО-МЯГКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ДО 100 кГц

Выполнено исследование динамических свойств композиционного магнитно-мягкого материала в диапазоне частот до 100 кГц при изменении толщины изоляционного слоя и размеров частиц железа. Показано, что с увеличением толщины изоляционного слоя потери на перемагничивание уменьшаются, но одновременно с этим имеет место снижение величины магнитной индукции насыщения и магнитной проницаемости.

Частотный диапазон гармонических колебаний до 100 кГц является наиболее востребованным и часто используемым в практике магнитных материалов при разработке источников питания, инверторных преобразователей различного назначения и ряда других применений. Представляет интерес изучение поведения в этом частотном диапазоне композиционных магнитно-мягких материалов для определения их возможности использования в сравнении с другими магнитными материалами. В [1; 2] ранее рассмотрены статические свойства композиционных магнитно-мягких материалов в сравнении с характеристиками листовой стали. В [3–5] изучена возможность использования композиционных материалов для построения электромоторов и других изделий на частотах 50–60 Гц.

Продолжением этих работ является изучение динамических характеристик композиционных материалов в более широком частотном интервале.

Целью настоящей работы является исследование свойств композиционных магнитно-мягких материалов, зависимостей потерь на перемагничивание в диапазоне гармонических колебаний до 100 кГц при различных толщинах изоляционных покрытий частиц порошка железа.

Методы эксперимента. Технология изготовления изолированных порошков магнитно-мягких материалов и изготовление из них изделий представляет собой многостадийный процесс, включающий следующие основные операции:

1. Предварительную подготовку исходных порошков (очистка поверхности, воздушная сепарация порошка по размерным фракциям).

2. Пассивацию порошков (защита от окисления) – нанесение на поверхность частиц порошка защитных компонентов. Для пассивации и защиты используются добавки высокотемпературных силиконовых лаков в количестве 0,25 % от веса порошка [6].

3. Нанесение изоляционных покрытий из газовой фазы в вакууме при температуре 150–200 °С. В работе исследовались композитные материалы на основе железных порошков ASC100.29, обработанных раствором ортофосфорной кислоты в этаноле для получения изоляционного покрытия. Магнитные параметры таких материалов несколько лучше тех, которые обрабатываются растворами оксидов кремния, хрома или бора.

4. Смазку изолированного порошка с помощью добавления раствора торфяного воска (peatwax) в количестве 0,15 % от исходного веса порошка.

5. Изготовление изделий путем гидростатического прессования изолированных порошков в специальных пресс-формах под давлением 0,7–0,8 ГПа при нормальных условиях. Спрессованные изделия подвергаются термообработке и нормализации физических параметров за счёт диффузионных процессов. Отжиг образцов производится при температуре 400 °С в вакууме или на воздухе в зависимости от требований.

Одним из главных достоинств рассматриваемой технологии, даже с учетом того, что технология в стадии доработки, является возможность равномерного нанесения защитных и изоляционных покрытий различного состава в широком диапазоне (от нанометров до микрометров). Кроме того, изделия из композиционного материала сохраняют размеры после прессования и последующего отжига.

Для определения магнитных характеристик изготавливались изделия из композиционного магнитного материала в виде колец размерами 24×13×8 мм методом порошковой металлургии путем прессования и последующего отжига в вакууме при 400 °С. Образцы изготовлены на основе порошка железа марки ASC100.29 с размером частиц $d > 0,1$ мкм и $d < 0,1$ мкм и со средней толщиной изоляции на основе оксида фосфора ~1 нм, а также образцы на основе ASC100.29 ($d < 0,05$ мкм) толщиной изоляционного слоя ~10, 20, 30 нм.

Измерения величин магнитных характеристик выполнялись на экспресс-магнетометре, где из зависимостей перемагничивания образцов определялись потери и остальные магнитные параметры.

Динамические характеристики композиционных магнитно-мягких материалов в частотном диапазоне до 100 кГц исследовались на установке, где в качестве силового элемента применялся низкочастотный усилитель TDA7293 мощностью 140 Вт (рис. 1). Входной сигнал от генератора ГЗ-112 усиливался и подавался на вход обмотки исследуемого сердечника, вторичная обмотка которого нагружалась активным сопротивлением 6 и 9 Ом. Выходные параметры контролировались двухканальным электронным цифровым осциллографом 2102СЕХ. Температура сердечника на открытом его участке контролировалась электронным термометром TP101.

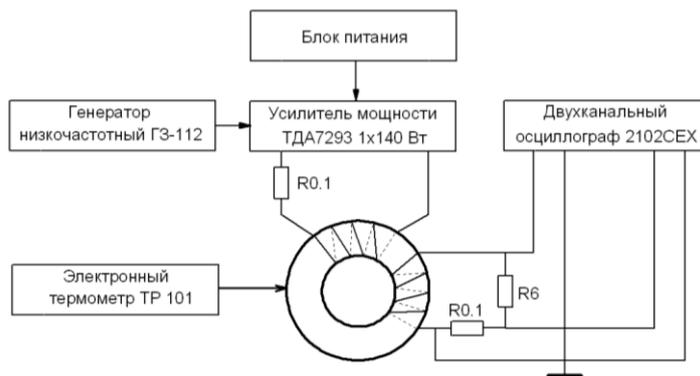


Рисунок 1 – Схема для исследования динамических свойств композиционных магнитно-мягких материалов

Измерения нагрева сердечника проводились в течение 10 минут на частотах 1, 5, 10, 25, 50 и 100 кГц при сохранении постоянной потребляемой мощности. Мощность W на нагрузке определялась с учетом угла сдвига φ на зависимостях изменения напряжения U_{ef} и тока I_{ef} :

$$W = U_{ef} I_{ef} \cos\varphi.$$

Расчетный вклад взаимоиנדукции в общую мощность на частоте 100 кГц не превышает 1 %. Экспериментально измеренный, несколько больше порядка 3 %, при меньших частотах вклад взаимоиנדукции можно было не учитывать.

На начальном участке зависимости процесс нагрева сердечника можно считать адиабатическим, практически без отвода тепла. В этом случае удельные потери на перемагничивание сердечника определяются [7]:

$$w = q \Delta T / \Delta t,$$

где q – удельная теплоемкость композиционного материала, $\Delta T / \Delta t$ – скорость нагрева сердечника.

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 приведены кривые намагничивания композиционного магнитно-мягкого материала на основе железного порошка ASC100.29. К примеру, композиционного материала на основе железного порошка ASC100.29 с размером частиц $d > 0,1$ мм (слой изоляции 1 нм) имеет следующий весовой состав, %:

Al	0,2	P	0,25	Mn	0,42
Si	0,32	Cr	0,08	Fe	98,73

Средние значения толщины изоляции для других составов рассчитывались исходя из процентного содержания фосфора в покрытии частиц порошка железа.

Из рис. 2 видно, что увеличение толщины изоляции приводит к значительному снижению максимального значения магнитной индукции.

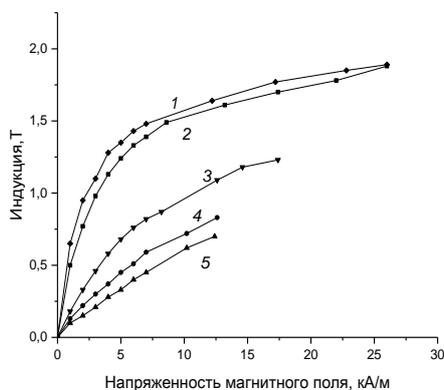


Рисунок 2 – Зависимости намагничивания композиционного материала на основе железного порошка ASC100.29 с размером частиц $d > 0,1$ мм (слой изоляции 1 нм) – 1, $d < 0,1$ мм (изоляция 1 нм) – 2, $d < 0,05$ мм (изоляция 10 нм) – 3, $d < 0,05$ мм (изоляция 20 нм) – 4, $d < 0,05$ мм (изоляция 30 нм) – 5

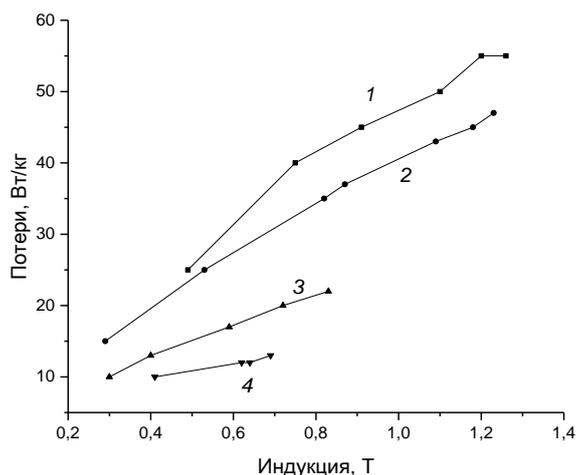


Рисунок 3 – Потери на перемагничивание на частоте 1 кГц для композиционного материала на основе железного порошка ASC100.29 $d < 0,1$ мм и толщиной изоляции 1 нм – 1, ASC100.29 $d < 0,05$ мм с толщиной изоляции 10 нм – 2, ASC100.29 $d < 0,05$ мм с толщиной изоляции 20 нм – 3, ASC100.29 $d < 0,05$ мм с толщиной изоляции 30 нм – 4

Из зависимостей рисунка 3 следует, что увеличение толщины изоляционного слоя приводит, с одной стороны, к понижению значений максимальной индукции и магнитной проницаемости, а с другой стороны – к заметному снижению потерь на перемагничивание материала.

На рис. 4 приведены зависимости нагрева сердечника при активной нагрузке и мощности 50 Вт. Скорость нагрева определялась по усредненным значениям во временном промежутке от 100 до 400 с, для которого нагрев можно считать адиабатным процессом.

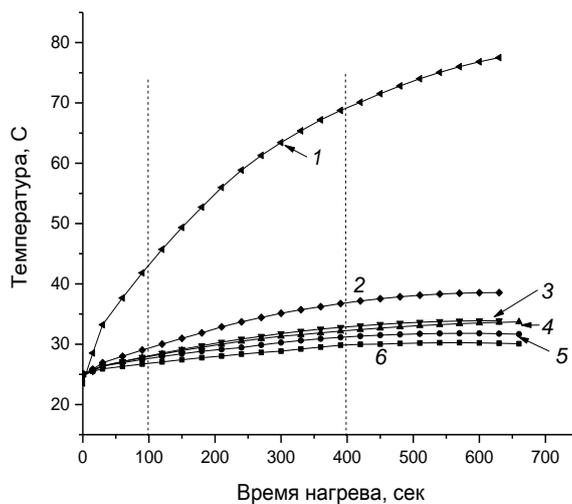


Рисунок 4 – Зависимости $T = f(t)$ нагрева сердечников композиционного магнитно-мягкого материала при постоянной напряженности магнитного поля $H = 3$ кА/м на основе порошка ASC100.29 $d < 0,1$ мм с изоляцией со средней толщиной 1 нм на частоте 1 кГц – 1, 5 кГц – 2, 10 кГц – 3, 25 кГц – 4, 50 кГц – 5 и 100 кГц – 6

Зависимости изменения магнитной индукции и удельных потерь от частоты при гармонических колебаниях приведены на рис. 5.

На рис. 6 приведены частотные зависимости потерь при гармонических колебаниях в полях от 0,25 до 1,5 Тл, анализ которых позволяет сделать вывод об экспоненциальном увеличении потерь с увеличением частоты.

На основе результата эксперимента, представленном на рис. 7, можно сделать вывод, что величина потерь на перемагничивание с увеличением толщины изоляционного слоя уменьшается.

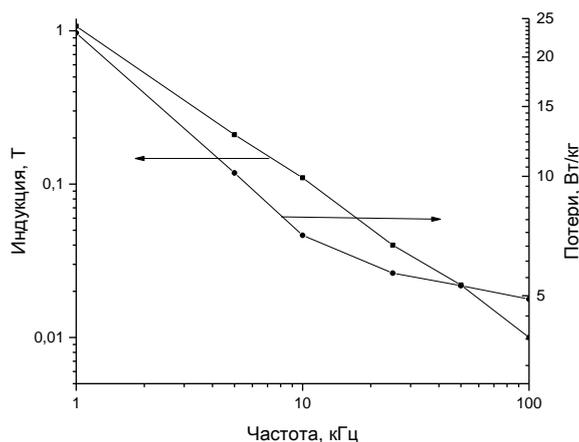


Рисунок 5 – Изменение индукции и величины удельных потерь от частоты при гармонических колебаниях для композиционного материала на основе порошка ASC100.29 $d < 0,1$ мм при постоянной напряжённости магнитного поля $H = 3$ кА/м

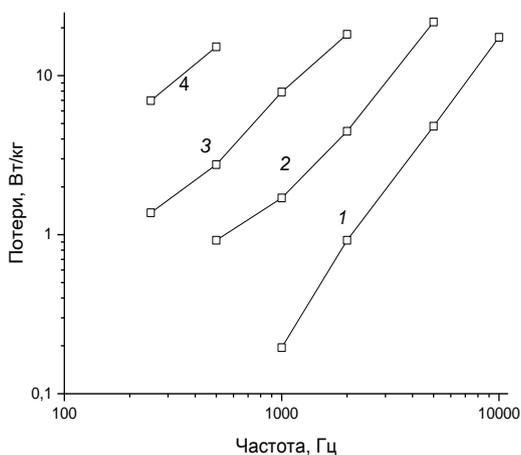


Рисунок 6 – Зависимость величины потерь от частоты при гармонических колебаниях для композиционного материала на основе порошка ASC100.29 $d < 0,05$ мм толщина изоляции ~ 1 нм при изменении магнитной индукции 0,25 Т – 1, 0,5 Т – 2, 1 Т – 3, 1,5 Т – 4

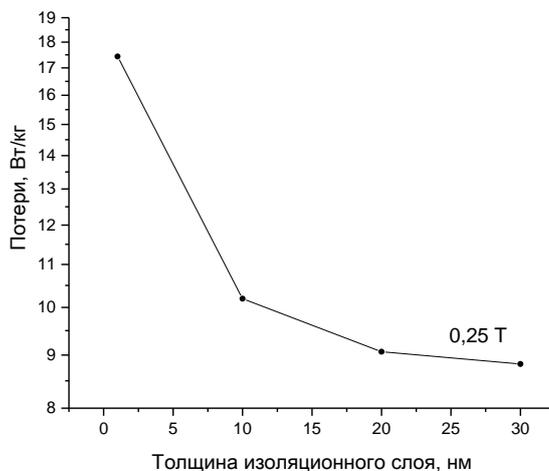


Рисунок 7 – Зависимость величины удельных потерь от толщины изоляционного покрытия на частоте 10 кГц при изменении индукции $\Delta B = 0,25$ Т

Анализируя результаты эксперимента можно сделать вывод, что увеличение толщины изоляционного слоя приводит к понижению величин максимальной индукции и магнитной проницаемости, а также к заметному снижению потерь на перемагничивание материала в исследуемом частотном диапазоне до 100 кГц. Потери на перемагничивание нового композиционного магнитного материала во многом определяются как величиной удельного сопротивления изоляционного покрытия, так и интегральным сопротивлением изоляционного слоя, связанного с толщиной изоляционного покрытия. В результате на частоте перемагничивания, к примеру 10 кГц и изменении индукции $\Delta B = 0,25$ Тесла, достичь уменьшения потерь в два раза можно при увеличении толщины изоляции в 30 раз от 1 нм до 30 нм. При этом величина индукции в магнитном поле 10 кА/м уменьшается в 2,7 раза от $B = 1,6$ Тесла до 0,6 Тесла.

Из этого следует, что решение о снижении потерь за счет повышения толщины изоляционного покрытия не является оптимальным. Предпочтительнее достичь снижения потерь на перемагничивание за счет увеличения удельного сопротивления изоляционного слоя при его минимальной толщине.

Список литературы

1. Говор, Г. А. Магнитные свойства низкочастотного композиционного магнитно-мягкого материала / Г. А. Говор, А. О. Ларин // Перспективные материалы. – 2018. – № 7. – С. 43–48.
2. Говор, Г. А. Композиционные магнитно-мягкие материалы на основе порошков железа / Г. А. Говор, В. В. Михневич // Неорганические материалы. – 2007. – Т. 43, № 7. – С. 805–807.
3. Говор, Г. А. Композиционные магнитно-мягкие материалы на основе порошков железа и перспективы их применения в технике. / Г. А. Говор, А. К. Вечер, В. И. Митюк // Металлофизика и новейшие технологии. – 2012. – Т. 34, № 4. – С. 439–444.
4. New SMC Material for Small Electric Machine / M. A. Grande [et al.] // IEEE Transaction on Industry Applications. – 2018. – Vol. 54, No.1. – P. 195–203.
5. Reseach of Harmonic Effects on Core Losses in SMC Materials // Y. Xinran [et al.] // IEEE Transaction on Magneti. – 2019. – Vol. 55, No. 2. – P. 1–5.
6. Патент РФ № 2465669. Способ изготовления композиционного магнитно-мягкого материала / Г. А. Говор, В. И. Митюк, А. В. Тамонов. – Оpubл. 27.10.2012.
7. Сычев, В. В. Сложные термодинамические системы / В. В. Сычев. – М., 1980. – 208 с.

The dynamic properties of the soft magnetic composite material in the frequency range up to 100 kHz with a change in the thickness of the insulating layer and the size of iron particles were investigated. It is shown that with an increase in the thickness of the insulating layer, the loss for remagnetization decreases, but at the same time there is a decrease in the magnetic value of the saturation induction and magnetic permeability.

Ларин Артём Олегович, аспирант ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь, new_alarin@mail.ru.

Научный руководитель – *Янушкевич Казимир Иосифович*, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физики магнитных материалов ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь, k.yanushkevitch@yandex.by.

УДК 004.451.9

А. С. ЛОТАШИНСКИЙ, Р. Р. КОРЕННОЙ, И. П. БЕЛОВ

МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ШЕСТИКАНАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ НАСТРОЙКИ ДВС

Представлены результаты разработки мобильного приложения для работы с шестиканальным измерителем давления на основе микроконтроллера семейства STM32F1. Приведена общая схема измерительной системы, описаны принципы ее работы.

В процессе использования мотоциклетных двигателей, замены комплектующих поршневой группы, ремонте карбюраторов, обслуживании топливной системы и прочих процедур обслуживания перед механиком стоит задача в синхронизации карбюраторов. Работа карбюраторов синхронна, если во всех впускных патрубках двигателя будет одинаковая величина разрежения в режиме холостого хода. Сам же процесс

синхронизации состоит в выравнивания давления в патрубках и требует использования устройств по измерению давления, различные модификации вакуумметров.

Данная работа является частью проекта по разработке шестиканального измерителя давления для автоматизации диагностики мотоциклетных двигателей. Проект реализован на основе микроконтроллера STM32 и приложения для устройств под управлением операционной системы (ОС) Android. Измеритель давления представлен микроконтроллером STM32F108C6, шестью датчиками BMP180, и Bluetooth модулем HC-05. В процессе работы измерителя микроконтроллер получает и обрабатывает информацию с датчиков с возможностью их дальнейшей передачи на Android устройство через Bluetooth. Для автономности работы измерителя давления на нем установлены аккумулятор и контроллер заряда.

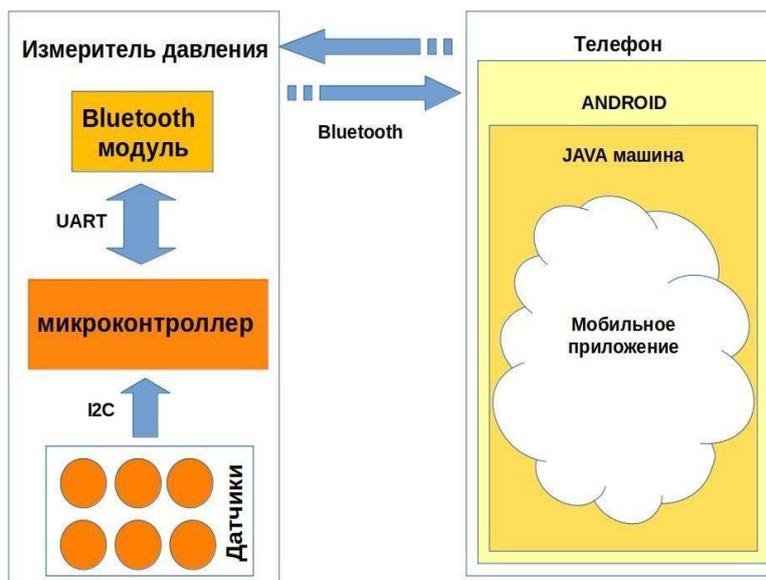


Рисунок 1 – Схема передачи данных между устройствами

Основным требованием к проекту было вывод информации с измерителя давления на мобильный телефон, так как это позволяет отображать данные в удобной для пользователя форме (например, в виде столбчатой диаграммы (рисунок 3)). Для этой цели было разработано мобильное приложение с рабочим названием Workshop. В качестве платформы была выбрана ОС Android так как она является самой распространенной операционной системой для мобильных устройств (занимает 74,3 % рынка мобильных ОС на февраль 2020 г. [1]), устанавливается на планшеты, смартфоны, ряд ноутбуков и устройства на которые данный проект не рассчитан: телевизоры, фитнес-браслеты, умные часы, игровые приставки и т. д.

Пользователь после запуска приложения видит список сопряженных Bluetooth устройств с телефоном, поэтому перед устройства его необходимо подключить к телефону по Bluetooth. Если устройство уже сопряжено или было подключено в процессе работы приложения, с ним можно установить соединение. После установки соединения с измерителем давления с него можно получать информацию или же регулировать его режимом работы. Сам же микроконтроллер работает с телефоном по принципу запрос-ответ. Телефон для получения информации должен отправить код операции и в зависимости от кода микроконтроллер выполняет нужные действия. Так, для получения информации с датчика, получить текущий уровень заряда или перевести в определенный режим работы необходимо отправить нужный код операции.

Получение данных от измерителя проходит по следующему алгоритму:

1. Приложение отправляет по Bluetooth код операции.
2. Микроконтроллер получает информацию, связанную с данным кодом.
3. Микроконтроллер обрабатывает полученную информацию и отправляет ее приложению.

Приложение поочередно получает информацию от микроконтроллера и из визуализирует данные. Через заданный интервал времени алгоритм повторяется. Само измерение давления после установки соединения с телефоном происходит только после обращения приложения к определенному датчику.

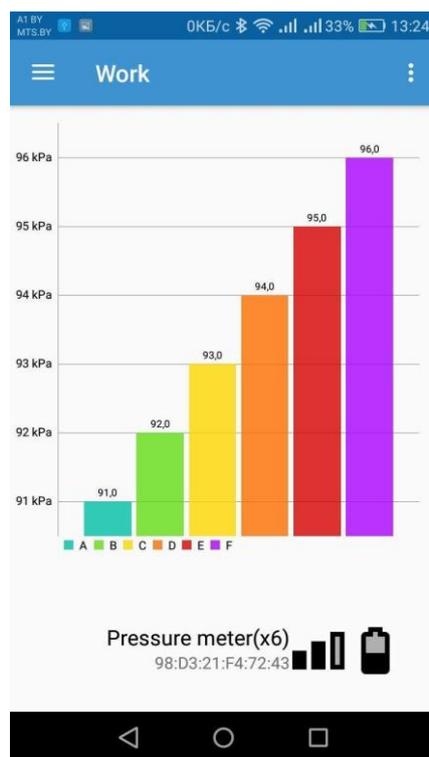


Рисунок 2 – Запущенное приложение на смартфоне

Перед пользователем измерителя стоит задача выравнивания давления на впускных патрубках двигателя. В связи с этим основной информацией на экране является актуальная информация о давлении от датчиков, среднее значение давления и уровень заряда аккумулятора. Каждый датчик обозначен своим латинским символом. В зависимости от двигателя и требований, можно отключать отдельные датчики, а также настраивать интервал обновления информации. Разработанное приложение при начале работы должно установить подключение к устройству, которое пользователь должен выбрать из списка найденных, после чего приложение начнет собирать и визуализировать информацию, поступающую от датчиков.

В качестве языка программирования был выбран Kotlin, среда разработки – Android Studio. Kotlin полностью совместим с языком программирования Java [9], что позволяет использовать библиотеки, написанные на Java в Android приложениях [11]. С 2019 года Google (основной разработчик Android) объявила Kotlin приоритетным языком программирования для разработки Android-приложений [17].

Приложения на Android состоят из компонентов [2]. В данном случае использовались компоненты: Операция (Activity), Служба (Service) и Навигация (Navigation).

Операция (Activity) представляет собой один экран с пользовательским интерфейсом. Так на ней можно разместить информацию, полученную с измерителя давления, список Bluetooth устройств или интерфейс для управления с каких датчиков получать информацию. Для переключения показываемой информации используется компонент навигации. В процессе работы приложения ОС Android может прервать выполнение Операции, закрыть или перестроить. В основном это связано с поворотом экрана, переключениями между приложениями и действиями пользователя. Чтобы информация, связанная с работой операции, не была потеряна в Android предусмотрены специальные классы ViewModel. Эти классы не удаляются в процессе работы с Операциями [5] и позволяют сохранять в них данные (свойства) и связанные с ними методы. После запуска Операции происходит подключение (привязывание) ее к Сервису. Дело в том, что сложные или долгие по выполнению действия могут привести к задержкам в работе пользовательского интерфейса что, вызывает подвисания или уведомления со стороны ОС Android «Приложение не отвечает». Поэтому все сложные действия необходимо выносить в отдельные потоки выполнения или сервисы. Сервисы могут работать даже после закрытия или сворачивания Операции, но могут быть остановлены ОС Android с целью экономии памяти устройства [6]. Привязанные службы к Операциям или Уведомлениям (компонент связанный с уведомлением в строке состояния) не закрываются и могут продолжать работу в фоновом режиме. Таким образом, в службу были вынесены методы связанные с получением информации через Bluetooth, список связанных Bluetooth устройств, подключение и отключение от измерителя давления. Процесс обмена данных с измерителем был вынесен в отдельный поток с применением ExecutorService [8]. Это позволяет запускать выполнение некоторых методов с определенным интервалом. Кроме того, в процессе передачи информации с измерителем может

произойти ошибка – соединение стало нестабильно или байт информации был потерян. Для этого `ExecutorService` предоставляет механизм для обработки исключения и время на выполнение операции (метода). Если процесс передачи информации затянулся или мы ожидаем получение данных слишком долго – процесс можно прервать, перезапустить или же вовсе разорвать соединение и не завершать выполнение всего приложения. Это позволяет исключить возможность зависания.

Связь информации между пользовательским интерфейсом и данными в сервисе реализовано через паттерн Слушатель (Observer) [15] и его реализацией в Android – LiveData[16]. В процессе работы приложения мы можем подписаться на какой-либо источник и реагировать на его изменение. Связывание происходит после привязывания к сервису. Компоненты пользовательского интерфейса регистрируются в некотором источнике и после изменения информации в источнике вызываются подписанные методы. Использование LiveData позволяет привязывать и отвязывать от источника информации элементы интерфейса по мере жизненного цикла Операции.

С исходным кодом приложения можно ознакомиться по ссылке <https://github.com/Lotashinski/Workshop>.

Список литературы

1. Mobile Operating System Market Share Worldwide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gs.statcounter.com/os-market-share/mobile/worldwide>. – Дата доступа: 28.02.2020.
2. Основы создания приложений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://developer.android.com/guide/components/fundamentals>. – Дата доступа: 28.02.2020.
3. Get started with the Navigation component [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://developer.android.com/guide/navigation/navigation-getting-started>. – Дата доступа: 28.02.2020.
4. Documentation for app developers. Android Developers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://developer.android.com/doc>. – Дата доступа: 25.02.2020.
5. ViewModel Overview [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://developer.android.com/topic/libraries/architecture/viewmodel>. – Дата доступа: 27.02.2020.
6. Службы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://developer.android.com/guide/components/services?hl=ru>. – Дата доступа: 28.02.2020.
7. Службы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://developer.android.com/guide/components/services?hl=ru>. – Дата доступа: 28.02.2020.
8. Многопоточность в Java: ExecutorService [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/116363/>. – Дата доступа: 28.02.2020.
9. Kotlin Programming Language [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kotlinlang.ru/>. – Дата доступа: 15.01.2020.
10. Bluetooth overview. Android Developers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://developer.android.com/guide/topics/connectivity/bluetooth?hl=ru>. – Дата доступа: 15.01.2020.
11. Modern Android development with Kotlin. Part 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://proandroiddev.com/modern-android-development-with-kotlin-september-2017-part-1-f976483f7bd6>. – Дата доступа: 20.12.2019.
12. Modern Android development with Kotlin. Part 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://proandroiddev.com/modern-android-development-with-kotlin-september-2017-part-2-17444fcdbe86>. – Дата доступа: 20.12.2019.
13. Modern Android development with Kotlin. Part 3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://proandroiddev.com/modern-android-development-with-kotlin-part-3-8721fb843d1b>. – Дата доступа: 20.12.2019.
14. Modern Android development with Kotlin. Part 4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://proandroiddev.com/modern-android-development-with-kotlin-part-4-4ac18e9868cb>. – Дата доступа: 20.12.2019.
15. Design Patterns – Observer Pattern [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.tutorialspoint.com/design_pattern/observer_pattern.htm. – Дата доступа: 28.12.2019.
16. LiveData Overview [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://developer.android.com/topic/libraries/architecture/livedata>. – Дата доступа: 28.12.2019.
17. Google объявила Kotlin приоритетным языком программирования для разработки Android-приложений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vc.ru/dev/66728-google-obyavila-kotlin-prioritetnym-yazykom-programirovaniya-dlya-razrabotki-android-prilozheniy>. – Дата доступа: 28.02.2020.

Белов Иван Павлович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, belov_ip@grsu.by.

Лоташинский Александр Сергеевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, lotashinsky_as@grsu.by.

Коренной Ростислав Русланович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, korenij_r@grsu.by.

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, german@grsu.by.

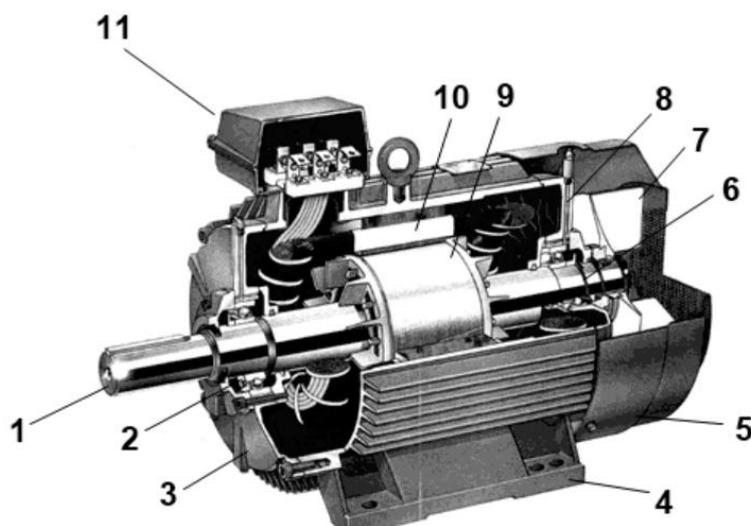
Е. А. МЕШКЕВИЧ

**АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ: ПРИНЦИП РАБОТЫ, ПРИМЕНЕНИЕ,
ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ**

Рассмотрены асинхронные двигатели, в частности, был изучен их принцип работы, устройство, применение, а также преимущества и недостатки.

В настоящее время широкое применение в различных областях человеческой жизнедеятельности получили однофазные и трехфазные асинхронные двигатели. Они находятся почти во всех технических агрегатах, которые мы видим каждый день, будь то пылесос, стиральная машина, система вентиляции. Это безусловно очень важное достижение прогресса, которое появилось в середине 19-го века, и было предвестником индустриальной эры.

Первый такой двигатель появился на свет примерно к 1891 году. Его создателем стал российский инженер М. О. Доливо-Добровольский. История жизни асинхронных двигателей гласит, что М. О. Доливо-Добровольский представил свое изобретение компетентной публике на выставке во Франкфурте-на-Майне. На выставке было представлено три трёхфазных двигателя разной мощности. Самый мощный из них имел мощность 1,5 кВт и использовался для приведения во вращение генератора постоянного тока. Конструкция асинхронного двигателя, предложенная Доливо-Добровольским, оказалась очень удачной и является основным видом конструкции этих двигателей до настоящего времени.

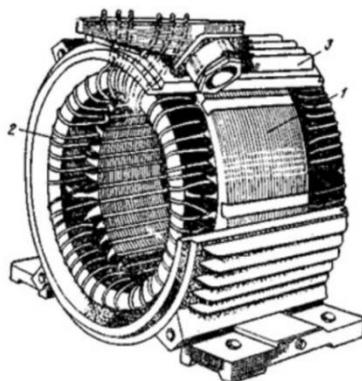


1 – вал; 2, 6 – подшипниковые щиты; 4 – лапы;
5 – кожух вентилятора; 7 – крыльчатка; 9 – короткозамкнутый ротор; 10 – статор; 11 – коробка выводов

Рисунок 1 – Асинхронный двигатель

Любой электродвигатель – это устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии в механическую. Основными компонентами асинхронного двигателя является статор и ротор.

Статор имеет цилиндрическую форму, и собирается из листов стали. В пазах сердечника статора уложены обмотки статора, которые выполнены из обмоточного провода. Оси обмоток сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол 120° . В зависимости от подаваемого напряжения концы обмоток соединяются треугольником или звездой.



1 – сердечник, 2 – обмотки статора, 3 – корпус

Рисунок 2 – Статор асинхронного двигателя

Под цифрой 1 обозначен сердечник. Его набирают из пластин, изготовленных из электротехнической стали толщиной порядка 0,5 мм. Благодаря этому уменьшаются вихревые токи. Собранные в пакеты пластины сердечника скрепляются скобами или швами и покрываются несколькими слоями изоляционного лака. Сердечник закрепляют в станине с помощью стопорных болтов.

Под цифрой 2 обозначены обмотки статора. Сдвинутые относительно друг друга на 120 градусов обмотки (обычно 3 штуки), вкладываются в пазы на внутренней стороне сердечника. Их изготавливают в основном из изолированного медного, а временами – и алюминиевого провода круглого или квадратного сечения. Электромотор подключают к трехфазной сети через клеммную коробку, на которую выводятся концы обмоток.

Под цифрой 3 обозначен корпус асинхронного двигателя. Корпус должен изготавливаться из немагнитного материала – чугуна или алюминия. Если размеры двигателя велики, при изготовлении корпуса применяют сварку. Двигателям этого типа свойственно воздушное охлаждение. Для повышения теплоотдачи на поверхности корпуса располагаются ребра. Подшипниковые щиты, кожух вентилятора и клеммную коробку тоже устанавливают снаружи. Лапы или фланцы на корпусе двигателя служат для его крепления.

Роторы асинхронного двигателя бывают двух видов: короткозамкнутый и фазный ротор.

Короткозамкнутый ротор представляет собой сердечник, набранный из листов стали. В пазы этого сердечника заливается расплавленный алюминий, в результате чего образуются стержни, которые замыкаются накоротко торцевыми кольцами. Эта конструкция называется «беличьей клеткой». В двигателях большой мощности вместо алюминия может применяться медь. Беличья клетка представляет собой короткозамкнутую обмотку ротора, откуда собственно название.

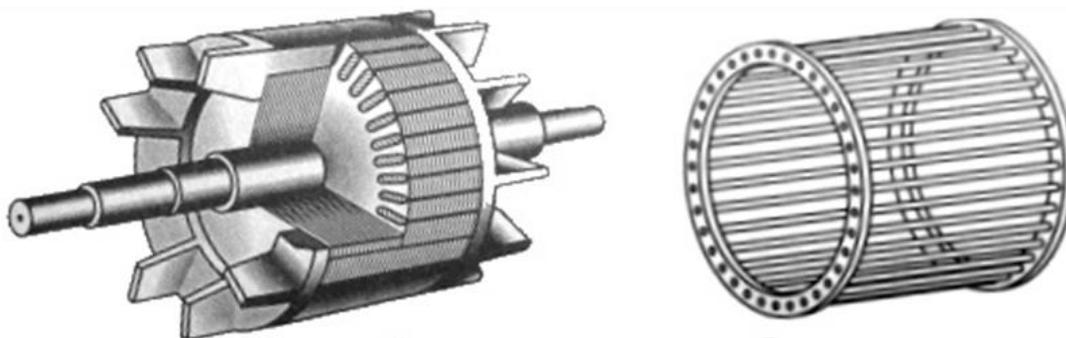
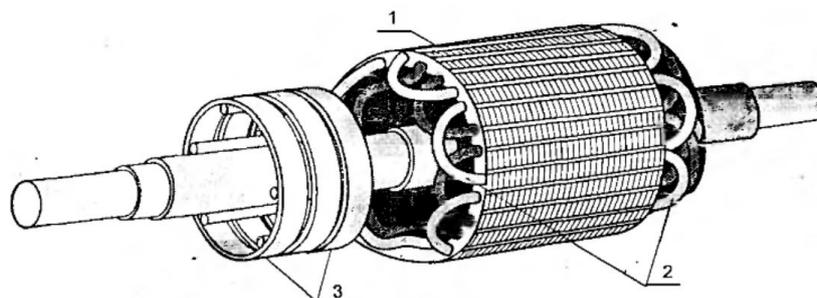


Рисунок 3 – Короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя

Фазный ротор имеет трёхфазную обмотку, которая практически не отличается от обмотки статора. В большинстве случаев концы обмоток фазного ротора соединяются в звезду, а свободные концы подводятся к контактным кольцам. С помощью щёток, которые подключены к кольцам, в цепь обмотки ротора можно вводить добавочный резистор. Это нужно для того, чтобы можно было изменять активное сопротивление в цепи ротора, потому что это способствует уменьшению больших пусковых токов. Подробнее о фазном роторе можно прочитать в [1].



1 – сердечник ротора, 2 – обмотка ротора, 3 – контактное кольцо

Рисунок 4 – Фазный ротор асинхронного двигателя

Вращающаяся часть асинхронного двигателя – ротор, так же, как и статор, имеет обмотку. Она помещена в пазах 1 стального цилиндра, набранного, как и сердечник статора, из листов электротехнической стали толщиной 0.5 мм. После штамповки листы собирают в пакет, плотно сжимают, насаживают на вал двигателя и закрепляют. В пазах ротора помещается или короткозамкнутая, или фазная обмотка. Изоляцией между листами ротора служит пленка окисла. Активная сталь ротора является частью магнитной цепи двигателя. Обмотка может быть фазной, построенной по тому же принципу, что и обмотка статора. Делается это в том случае, когда в фазы обмотки включается добавочное сопротивление (реостат), необходимый при пуске или регулировании скорости двигателя. Обмотка ротора 2 соединяется в звезду, а выводы подключаются к трем контактными кольцам 3 (рисунок 4), насаженным на вал ротора и изолированных от вала и друг от друга. Контактные кольца изготавливаются из меди, бронзы, редко из стали.

При подаче к обмотке статора напряжения, в каждой фазе создаётся магнитный поток, который изменяется с частотой подаваемого напряжения. Эти магнитные потоки сдвинуты относительно друг друга на 120° , как во времени, так и в пространстве. Результирующий магнитный поток оказывается при этом вращающимся.

Результирующий магнитный поток статора вращается и тем самым создаёт в проводниках ротора ЭДС. Так как обмотка ротора, имеет замкнутую электрическую цепь, в ней возникает ток, который в свою очередь взаимодействуя с магнитным потоком статора, создаёт пусковой момент двигателя, стремящийся повернуть ротор в направлении вращения магнитного поля статора. Когда он достигает значения, тормозного момента ротора, а затем превышает его, ротор начинает вращаться.

Частота вращения магнитного поля статора (n_1) больше, чем частота вращения ротора (n_2). Разница между ними называется скольжением, а обозначается латинской буквой S и вычисляется по формуле:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} * 100\%$$

Скольжение не является недостатком электродвигателя, поскольку если бы его вал вращался с той же частотой, что и магнитное поле статора (синхронно), то в его стержнях не индуцировался бы ток, и он бы просто не стал вращаться.

Теперь о более важном понятии – частота вращения ротора асинхронного электродвигателя. Она зависит от трех величин:

- 1) частота напряжения питающей сети (f);
- 2) число пар магнитных полюсов (p);
- 3) скольжение (S).

Число пар магнитных полюсов определяет синхронную скорость вращения поля и зависит от числа обмоток статора. Скольжение зависит от нагрузки и конструкции конкретного электродвигателя и лежит в пределах 3–10 %, то есть асинхронная скорость совсем немного меньше синхронной. Ну, а частота переменного тока у нас фиксирована и равняется 50 Гц.

Частота вращения поля статора (синхронная скорость) определяется по формуле:

$$n = \frac{f}{p} * 60$$

Так в двигателе с одной парой магнитных полюсов (два полюса) синхронная скорость равна:

$$\frac{60 * 50}{1} = 3000 \text{ об/мин}$$

Наиболее распространены следующие варианты электродвигателей с:

- 1) одной парой полюсов (3000 об/мин);
- 2) двумя (1500 об/мин);
- 3) тремя (1000 об/мин);
- 4) четырьмя (750 об/мин).

Реальная скорость вращения ротора будет несколько ниже, на реальном асинхронном двигателе она указывается на шильдике, например – 2730 об/мин. Несмотря на это, в народе такой асинхронный двигатель будут называть согласно синхронной скорости или просто «трёхтысячник».

Тогда его скольжение равняется:

$$3000 - \frac{2730}{3000} * 100\% = 9\%$$

Как только наступит равновесие между электромагнитным моментом, вызывающим вращение ротора и тормозным моментом создаваемым нагрузкой на валу двигателя процессы изменения величин прекратятся.

Выходит, что принцип работы асинхронного двигателя заключается во взаимодействии вращающегося магнитного поля статора и токов, которые наводятся этим магнитным полем в роторе. Причём вращающий момент может возникнуть только в том случае, если существует разность частот вращения магнитных полей.

Асинхронные электродвигатели в основном выпускают двух видов: трёхфазные и однофазные. В свою очередь, трёхфазные подразделяются на подвиды: с короткозамкнутым ротором или фазным ротором. Различие этих двигателей указано в таблице.

Вид двигателя	Преимущества	Недостатки
Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором	<ol style="list-style-type: none"> 1. Очень простое устройство, что позволяет сократить затраты на его изготовление. 2. Цена намного меньше по сравнению с другими двигателями. 3. Очень простая схема запуска. 4. Скорость вращения вала практически не меняется с увеличением нагрузки. 5. Хорошо переносит кратковременные перегрузки. 6. Возможность подключения трёхфазных двигателей в однофазную сеть. 7. Надёжность и возможность эксплуатировать практически в любых условиях. 8. Имеет очень высокий показатель КПД и cosφ. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Нет возможности контролировать частоту вращения ротора без потери мощности. 2. Если увеличить нагрузку, то уменьшается момент. 3. Пусковой момент очень мал по сравнению с другими машинами. 4. При недогрузе увеличивается показатель cosφ 5. Высокие показатели пусковых токов.
Асинхронный двигатель с фазным ротором	<ol style="list-style-type: none"> 1. По сравнению с короткозамкнутыми двигателями, имеет достаточно большой вращающий момент. Что позволяет его запускать под нагрузкой. 2. Может работать с небольшим перегрузом, и при этом частота вращения вала практически не меняется. 3. Небольшой пусковой ток. 4. Можно применять автоматические пусковые устройства 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Большие габариты. 2. Показатели КПД и cosφ меньше, чем у двигателей с короткозамкнутым ротором. И при недогрузе эти показатели имеют минимальное значение 3. Нужно обслуживать щёточный механизм.

Асинхронные двигатели активно используются во многих отраслях промышленности и сельского хозяйства. Они потребляют примерно 70 % всей энергии, предназначенной для преобразования электричества во вращательное или поступательное движение. Асинхронные двигатели зарекомендовали себя наиболее эффективными в качестве электрической тяги, без которой не обходятся многие технологические операции. Асинхронные двигатели обладают множеством положительных качеств. Простая конструкция позволяет

изготавливать наиболее дешевые и надежные устройства. Минимальные расходы по эксплуатации обеспечиваются отсутствием скользящего узла токосъема, что одновременно повышает и надежность агрегата.

Наибольшее распространение получили трехфазные асинхронные электродвигатели – они используются во всех сферах народного хозяйства (станки и оборудование, автоматика, телемеханика и т. д.).

Электродвигатель с короткозамкнутым ротором используется в электроприводах разных станков (металлообрабатывающих, грузоподъемных, ткацких, деревообрабатывающих), в вентиляторах, землеройных машинах, в лифтах, насосах, бытовых приборах и т. д.

Список литературы

1. Лихачев, В. Л. Электродвигатели асинхронные / В. Л. Лихачев. – М. : СОЛОН-Р, 2002. – 304 с.
2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.0642.ua/list/113172>.
3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fazanet.ru/ustrojstvo-i-princip-dejstviya-asinxronnyx-elektrodvigatelej.html>.
4. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://electroandi.ru/elektricheskie-mashiny/asdvig/asinkhronnyj-dvigatel-printsip-raboty-i-ustrojstvo.html>.
5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://samelectrick.ru/chto-takoe-asinxronnyj-dvigatel-i-kak-on-rabotaet.html>.
6. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.szemo.ru/press-tsentr/article/stator-asinkhronnogo-dvigatelya-ustrojstvo-i-printsip-raboty>.
7. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cable.ru/articles/id-787.php>.
8. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://electric-220.ru/news/asinkhronnyj_dvigatel/2017-12-09-1400.

In this review research work, asynchronous motors were considered, in particular, their operating principle, device, application, as well as advantages and disadvantages were studied.

Мешкевич Екатерина Александровна, студентка физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, kmeshkevich2001@gmail.com.

Научный руководитель – *Комар Владимир Николаевич*, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой электротехники и электроники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

УДК 621.373.825+533.924:939.234

М. В. ПУЗЫРЁВ, Д. П. ПРОКОПЕНЯ, Н. И. ШУЛЬГАН

ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ В ВАКУУМЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ НАНОПОКРЫТИЙ

Создан лазерно-плазменный источник с управляемыми параметрами для осаждения нанопокровтий различных материалов в вакууме на различные подложки.

Проблема нанесения наноразмерных тонкопленочных покрытий является едва ли не самой обширной среди современных актуальных направлений технологии и материаловедения. В настоящее время, повышенное внимание уделяется проблеме получения на основе материалов с известными характеристиками новых, модифицированных структур с улучшенными параметрами.

В процессе исследований воздействия мощного лазерного излучения на твердое тело необходимо определить особенности его разрушения, влияние специфики разрушения на содержимое ионизированных и возбужденных атомов в образованной плазме, выявление возможностей увеличения чувствительности лазерного спектрального анализа и получения информации о структуре твердого тела. Исследования структуры, состава и процессов в лазерном эрозионном факеле являются важными, также учитывая перспективность получения тонких пленок методом импульсного лазерного напыления. Таким образом, можно получать ряд необходимых свойств материала пленки подбором условий напыления, материала мишени и подложки. Особое значение имеет знание параметров такой плазмы, которые в значительной степени определяют качество пленки. Особенно это касается многокомпонентных материалов, для которых остро стоит вопрос стехиометрии и структуры, а для исследования этого направления в литературе очень малочисленны.

Применение пленок таких материалов является чрезвычайно разнообразным: солнечные элементы, лазерные диоды, различные детекторы и преобразователи энергии, нелинейные кристаллические структуры и светофильтры. Необходимость исследования спектрального состава излучения лазерной плазмы и изменений интенсивности излучения при разлете плазменного факела обусловлена также выявлением возможностей установления обратной связи и автоматизации контроля технологических процессов, где имеет место образование лазерной плазмы, а особенно при лазерном напылении.

Для этого необходимо связать интенсивность определенных, характеристических для лазерной плазмы, спектральных линий с условиями напыления, которые определяют качество пленки. До этого времени такие процессы не контролировались непосредственно, а только через исследования уже готового продукта.

В [1] исследована физика процессов возникновения, развития и распада паро-плазменных потоков, формирующихся при воздействии интенсивных наносекундных лазерных импульсов на массивные металлические мишени в воздухе.

В [2; 3] приведены результаты напыления лазерным способом нанополюков цинка, алюминия и меди.

В [4] получены однослойные и многослойные покрытия с комбинацией слоёв углерода с высоким содержанием sp^3 -связей и алюминия и определены режимы осаждения такого покрытия с целью обеспечения высокой адгезии к подложке.

Однако, эти эксперименты показали и недостатки такого метода напыления. Для регулирования режимов нанесения нанополюков в этом случае использовались только изменения двух параметров: изменение плотности мощности воздействующего на мишень лазерного излучения и расстояния от мишени до подложки.

При автоматизации процессов напыления в вакууме регулировка оптической системы с целью изменения плотности мощности лазерного излучения и плавное изменение расстояния мишень-подложка достаточно громоздки и ненадёжны.

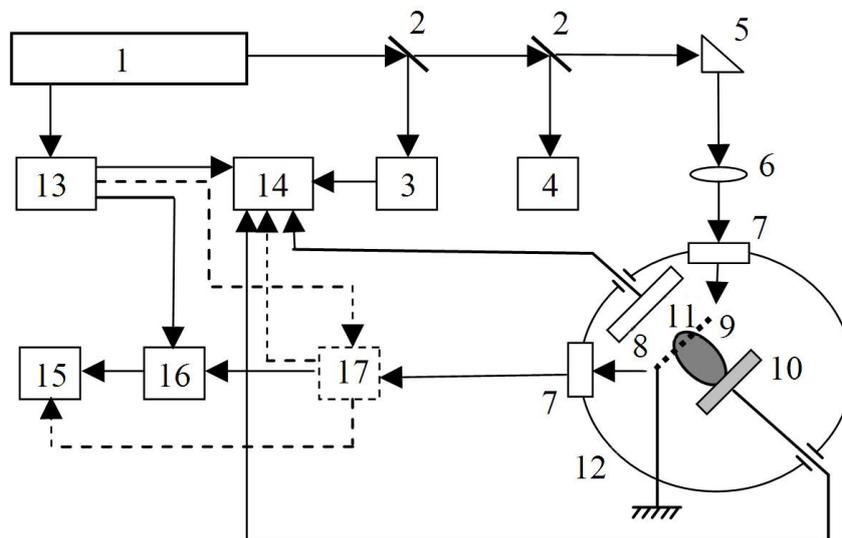
Поэтому необходимо было создать систему контроля и управления осаждением нанополюков относительно простым способом без разгерметизации вакуумной камеры.

Экспериментальное оборудование. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 1.

Меняя местоположение датчиков 16 и 17, мы можем контролировать либо пространственное свечение эрозивного лазерного факела, либо его временные и спектральные характеристики.

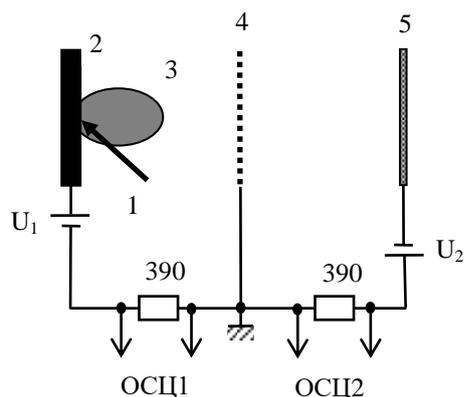
Для воздействия на мишень был использован YAG:Nd³⁺ лазер LS-2137 фирмы Lotis-TII с длиной волны $\lambda = 1064$ нм и длительностью импульса на полувысоте $\tau = 20$ нс. Мишень была изготовлена из технического чистого серебра и устанавливалась под углом 45° к оси лазерного луча. Эксперименты проводились в вакууме при давлении остаточных газов $\sim 10^{-3}$ Па. Мишень вращалась со скоростью 2 об/мин, чтобы предотвратить образование глубокого кратера на поверхности мишени, что может сказаться на пространственной форме эрозивного факела. Контроль временных характеристик проводился с помощью осциллографа Tektronix TDS 2022B.

Результаты и обсуждение. Лазерно-плазменный источник представляет собой лазерную мишень и подложку, между которыми располагалась сетка (рис. 1). При подаче отрицательного напряжения на сетку по отношению к мишени из лазерной плазмы после сетки формируется поток ионов. Энергия ионов регулируется положительным потенциалом на подложке по отношению к сетке. Сетка заземлена (см. рис. 2). Для различных энергий лазерного излучения были экспериментально получены импульсы тока ионов на подложке (см. рис. 3).



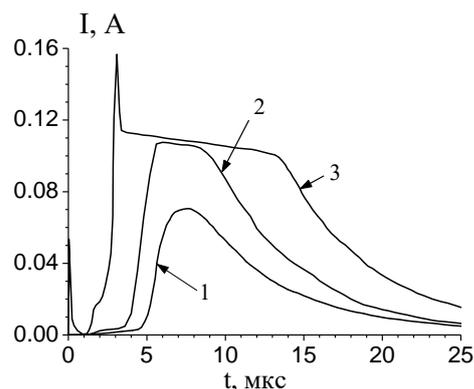
1 – лазер, 2 – светоделительные пластины, 3 – фотодиод, 4 – измеритель энергии, 5 – призма полного внутреннего отражения, 6 – линза, 7 – окна, 8 – подложка, 9 – сетка, 10 – мишень, 11 – плазменный факел, 12 – вакуумная камера, 13 – блок синхронизации, 14 – осциллограф, 15 – персональный компьютер, 16 – фотокамера на основе ПЗС-матрицы, 17 – спектрометр

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для осаждения наноструктурированных плёнок



1 – лазерное излучение,
2 – мишень, 3 – эрозионный факел, 4 – сетка,
5 – подложка

Рисунок 2 – Схема эксперимента



1 – $8,9 \cdot 10^8$ Вт/см², 2 – $1,0 \cdot 10^9$ Вт/см², 3 – $1,8 \cdot 10^9$ Вт/см²

Рисунок 3 – Общий ток в цепи сетка-подложка: при потенциалах сетка-мишень 20 В и сетка-подложка 50 В при различных плотностях мощности воздействующего лазерного излучения

При меньшей плотности мощности лазерного излучения кривая ионов тока в промежутке сетка – подложка представляет собой несимметричный колокол (рис. 3, (1)). При увеличении плотности мощности лазерного излучения увеличивается температура в эрозионной лазерной плазме и, как следствие, растёт ионизация, а значит и ионный ток в промежутке сетка – подложка. При этом наблюдается заметная вторичная эмиссия ионов за счёт этого обратного тока ионов происходит ограничение вершины импульса ионного тока в цепи сетка – подложка (рис. 3, (2)).

При дальнейшем увеличении плотности мощности лазерного излучения происходит ещё большее ограничение вершины импульса ионного тока (рис. 3, (3)). Острый пичёк на переднем фронте импульса тока можно объяснить обратным током электронов в цепи сетка – подложка.

Результаты экспериментов, представленных на рис. 3, можно объяснить следующим образом. При кинетических энергиях ионов, зависящих от плазодинамических характеристик эрозионного лазерного факела и электрического потенциала в промежутке сетка – подложка, в режиме, изображенном на рис. 3 (1), на переднем фронте импульса ионы в основном осаждаются на подложку, и только незначительная часть вызывает вторичную эмиссию. При увеличении плотности ионов (ионного тока) вторичная эмиссия сказывается значительно сильнее (рис. 3 (2, 3)).

Если в дальнейшем увеличивать отрицательный потенциал на подложке по отношению к сетке ток ионов на подложку увеличивается за счёт увеличения скорости ионов. И вместе с этим ограничение импульса тока уменьшается вплоть до полного исчезновения. Это можно объяснить тем, что ионы, приобретая более высокую кинетическую энергию из-за уменьшения сечения взаимодействия в основном проникают вглубь мишени (имплантируются) и вторичная эмиссия уменьшается.

В работе изучены режимы лазерно-плазменного источника напыления нанопленок при различных плотностях мощности воздействующего лазерного излучения.

Экспериментально обоснован метод контроля тока первичных и вторичных ионов, выбиваемых с подложки. Для технологических режимов нанесения нанопокрываний лазерно-плазменным методом важно знать, при каких условиях происходит травление поверхности подложки, создание псевдодиффузионного слоя и нанесение материала лазерной мишени на поверхность подложки. Используя последовательно эти режимы можно получить высокоадгезионные нанопокрывания без разгерметизации вакуумной камеры.

Список литературы

1. Козадаев, К. В. Физика лазерно-индуцированных плазменных потоков при действии наносекундных импульсов на металлы при атмосферном давлении / К. В. Козадаев // ИФЖ. – 2014. – Т. 87, № 3. – С. 682–693.
2. Напыление металлических пленок лазерным методом / В. К. Гончаров [и др.] // Вестник БГУ. Сер. 1. – 2013. – № 3. – С. 50–55.
3. Гончаров, В. К. Осаждение наноразмерных пленок Cu и Al в вакууме лазерным методом / В. К. Гончаров, Г. А. Гусаков, М. В. Пузырев // ИФЖ. – 2013 – Т. 86, № 5. – С. 960–966.
4. Goncharov, V. K. The laser deposition of composite metallic carbon films / V. K. Goncharov, G. A. Gusakov, M. V. Puzyrev // Belarus and Serbia on Physics and Diagnostics of Laboratory and Astrophysical Plasmas : articles of X Symposium, Belgrade, 24–30 August 2014 / eds. M. M. Kuraica, B. M. Obradovic and N. Cvetanovic. – Belgrad, 2014. – P. 33–36.

Laser-plasma source has been produced with controllable parameters for the deposition of nanofilms of different materials in vacuum on different substrates.

Пузырёв Михаил Валентинович, кандидат физико-математических наук, доцент, НИИПП им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, Puzyrev@bsu.by.

Прокопеня Дмитрий Павлович, магистрант Института подготовки научных кадров НАН Беларуси, Минск, Беларусь, dmitry.prokopenia@gmail.com.

Шульган Никита Игоревич студент факультета радиопизики и компьютерных технологий Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, nikita.shulgan@gmail.com.

УДК 004.9

А. Г. РАПЕЙ

3D-ТЕХНОЛОГИИ: БУДУЩЕЕ УЖЕ СЕГОДНЯ

Рассматриваются устройство, принцип работы и сферы применения 3D-технологий в различных сферах жизнедеятельности, а также основные сферы применения 3D-технологий, их преимущества перед другими методами производства предметов жизнеобеспечения. Затронуты сферы медицины, строительства, космос и дальнейшее развитие 3D-технологий.

3D-принтер – устройство, использующее метод послойного создания физического объекта по цифровой 3D-модели.

3D-печать может осуществляться разными способами и с использованием различных материалов, но в основе любого из них лежит принцип послойного создания (выращивания) твёрдого объекта.

Есть много технологий для создания 3D-объектов на 3D-принтере.

Технологии, применяемые для создания слоев:

Лазерная-стереолитография [1] – ультрафиолетовый лазер постепенно, пиксель за пикселем, засвечивает жидкий фотополимер, либо фотополимер засвечивается ультрафиолетовой лампой через фотошаблон, меняющийся с новым слоем. При этом жидкий полимер затвердевает и превращается в достаточно прочный пластик.

Лазерное сплавление [1] – при этом лазер сплавляет порошок из металла или пластика, слой за слоем, в контур будущей детали.

Ламинирование [1] – деталь создаётся из большого количества слоёв рабочего материала, которые постепенно накладываются друг на друга и склеиваются, при этом лазер вырезает в каждом контуре сечения будущей детали.

Лазерная стереолитография – объект формируется из специального жидкого фотополимера, затвердевающего под действием лазерного излучения (или излучения ртутных ламп). При этом лазерное излучение формирует на поверхности текущий слой разрабатываемого объекта, после чего, объект погружается в фотополимер на толщину одного слоя, чтобы лазер мог приступить к формированию следующего слоя.

Электронно-лучевая плавка – аналогична технологиям SLS/DMLS, только здесь объект формируется путем плавления металлического порошка электронным лучом в вакууме.

Полимеризация фотополимерного пластика под действием ультрафиолетовой лампы – способ похож на предыдущий, но пластик твердеет под действием ультрафиолета.

Трёхмерная печать в строительстве. Интерес военных к строительству с помощью трёхмерной печати объясняется несовершенством современных технологий строительства, которые не подходят для развертывания в удаленных регионах без соответствующей инфраструктуры. С другой стороны, трёхмерный принтер с командой инженеров можно привезти на место с помощью военно-транспортного самолета и уже на месте за неделю возвести надежный укрепленный полевой лагерь. Строительный принтер, как и обычный настольный 3D-принтер, также изготавливает объемные объекты, укладывая сырье слой за слоем. Однако вместо пластмассы он использует быстро твердеющий бетон, из которого возводится фундамент, стены и крыша здания. Форма постройки может быть любой, причем алгоритм может самостоятельно рассчитывать прочность здания, возводя постройки, способные выдержать давление до 10 000 psi. Для сравнения: обычные постройки выдерживают давление примерно 7000 psi, а сооружения, выдерживающие 14 500 psi и выше, считаются сверхпрочными.

Обычный жилой дом двое операторов строительного 3D-принтера могут возвести за сутки. Плюсом трёхмерной печати является и то, что 3D-принтер может работать круглые сутки Голландский архитектор Яняап Рёйссенаарс (Janjaap Ruijssenaars) планирует построить двухэтажное здание с помощью технологии 3D-печати, сообщает Los Angeles Times [3]. Здание под названием Landscape House имеет форму ленты Мебиуса –

пол в нем постепенно переходит в потолок и обратно. По мнению архитектора, такое сооружение идеально впишется в естественный ландшафт. Для того чтобы построить сооружение архитектор планирует использовать 3D-принтер под названием D-Shape, разработанный итальянским конструктором Энрико Дини (Enrico Dini). Используя песок и специальную скрепляющую смесь, данный агрегат способен создавать объекты по прочности, не уступающие конструкциям из бетона. С помощью D-Shape будут созданы элементы конструкции здания размером 9 × 6 метров, из которых оно будет построено. Каждый элемент будет создан принтером путем склеивания 5-миллиметровых слоев песка. «В традиционном строительстве вам необходимо сооружать деревянную опалубку, заливать в нее бетон, ждать, когда он застынет, затем разбирать опалубку. На это уходит уйма времени и сил, – заявил архитектор. – Вы можете просто напечатать то, что желаете. Это более простой способ возведения конструкций». После чего Рёйссенарса сказал: «Для меня как архитектора печать является отличным способом реализации идеи здания с особенным дизайном, в котором пол и потолок перетекают друг в друга бесконечно».

В своем рассказе «Необходимая вещь», написанном в 1955 году, Роберт Шексли описал конфигуратор, который двое космонавтов взяли с собой в межзвездную экспедицию для того, чтобы печатать на нем все, что им может понадобиться в космосе – от запчастей для корабля до яблочного штруделя на десерт. Прошло чуть более полувека, и реальность хоть и не переплюнула воображение писателя, но вплотную к нему приблизилась. НАСА ведет разработку 3D-принтера для печати запчастей прямо на МКС. Действительно, развитие 3D-принтеров в ближайшем будущем может существенно повлиять на космическую отрасль в целом и на перспективы развития отдельных конструкторских бюро, в частности.

Рассмотрим существующие и потенциальные возможности использования 3D-принтеров *в космонавтике и космической промышленности*. 3D-печать может найти применение в космосе в следующих перспективных направлениях: Американское космическое агентство NASA и компания Made in Space осенью 2014 года собираются отправить на МКС первый 3D-принтер для производства различных деталей: запчастей, инструментов и научного оборудования. Принтер будет изготавливать модели послойно из полимеров и иных материалов. 3D-модели для создания объектов помещены в память устройства либо будут передаваться с Земли в случае необходимости. С новой технологией связывают грандиозные перспективы в оптимизации работы на орбите: от самого простого – трехмерной печати каких-то сломавшихся деталей, до самостоятельного создания роботов, навигационных систем, скафандров и исследовательского оборудования. 3D-принтеры для создания в космосе крупногабаритных конструкций NASA в рамках программы NIAC в 2013 году выделило компании Tethers Unlimited, Inc. (TUI) 500 тыс. долл. на дальнейшее развитие технологии автоматизированной сборки в космосе SpiderFab. В основе технологии лежит трасселатор (Trusselator) – устройство, представляющее собой своеобразную помесь 3D-принтера и вязальной машины. Устройство в настоящее время успешно проходит испытания в лаборатории. На одной стороне цилиндрического корпуса расположена катушка с нитью (в качестве сырья устройство использует пластик, например, углеволокно), а на другом находится экструдер, через который выдавливаются три основные трубы будущей фермы или другой конструкции. Ферма усиливается путем обмотки нитью, в итоге робот длиной около метра может создать ферму длиной в десятки метров. Технология позволяет изготавливать в космосе очень большие, длиной в несколько километров, каркасы космических кораблей, фермы антенн, базовые структуры солнечных электростанций, огромных телескопов и т. д. В настоящее время конструкции, которые отправляются в космос, имеют огромный избыточный запас прочности для того, чтобы выдержать перегрузки при старте. Обычно в космосе такие сверхпрочные конструкции не нужны, зато нужен очень большой размер, например, для телескопов-интерферометров. Аппараты SpiderFab позволяют строить именно такие конструкции: легкие, крупногабаритные и с низкой стоимостью жизненного цикла. Все необходимые части орбитального производственного комплекса SpiderFab можно вывести в космос с помощью существующих ракет-носителей. Фактически, даже при нынешних технологиях SpiderFab позволяет реализовать прорывные проекты, вроде строительства космических станций за орбитой Луны или солнечных электростанций мощностью в сотни мегаватт. При этом стоимость конструкций, произведенных с помощью SpiderFab, будет относительно небольшой. В 2011 году NASA опубликовало свой проект строительства лунной базы с участием большого количества роботов (экскаваторы, бульдозеры, измельчители и т. д.). Сейчас Европейское космическое агентство предложило альтернативный проект 3D-печати лунной базы, используя в качестве строительного материала местный грунт. Для печати используется принтер D-Shape от британской компании Monolite. Для печати использовался материал, на 99,8 % аналогичный реголиту, полученный из базальтовых пород одного из вулканов в центральной Италии. Печатающая головка База состоит из четырёх жилых модулей, из них центральный и верхний левый модули уже закончены, а ещё два находятся в последней стадии строительства. Жилые модули соединены тоннелями, на каждом из них есть по четыре люка-иллюминатора. Примерный размер базы можно оценить в сравнении с астронавтом, который стоит рядом с центральным модулем. Сейчас 3D-принтеры пытаются применить в строительстве на Земле. Китайская компания WinSun сообщила о том, что ее новый 3D-принтер позволит создавать доступное и недорогое жилье в невероятно сжатые сроки – за 24 часа компания

может отпечатать 10 домов площадью в 200 квадратных метров каждый. Себестоимость одного напечатанного здания около 5 тыс. долл.

Пищевые 3D-принтеры. В 2013 году NASA объявило о финансировании разработки первого в мире 3D-принтера, который будет создавать еду. Такое устройство поможет космонавтам при длительных полетах в космос. Новый принтер может готовить еду из ингредиентов, которые хранятся в порошковой форме в специальных картриджах. Смешав содержимое разных картриджей, добавив воду или масло, можно получить различные блюда. 3D-принтер распыляет ингредиенты слой за слоем, создавая твердую трехмерную пищу. Первое, что получают с помощью 3D-принтера, станет пицца. Сначала распечатывают тесто, затем томатную основу, а после этого протеиновый слой. При этом источником протеинового слоя может стать все, что угодно, включая животных, молоко и растения. Альтернативными ингредиентами могут быть насекомые и водоросли. Срок годности одного пищевого картриджа составляет около 30 лет, что достаточно, например, для полета на Марс.

Трехмерная печать в медицине.

Мировая медицина активно внедряет в практику новейшие технологии и прорывные разработки ученых с 2010 года. Применение 3D-печати в отечественной клинической практике пока фрагментарно, но интерес общественности, государства и докторов к перспективной технологии усиливается с каждым годом. Осенью 2016 г. состоялась первая конференция по биотехнологиям, персонализированной медицине и тканевой инженерии «Биотехмед». Эксперты области и министр здравоохранения РФ подтвердили ценность современных методик и оборудования и признали, что биомедицинские технологии, 3D-сканирование и печать откроют новые возможности врачам и помогут повысить качество и доступность медицинской помощи в стране. Как технологии меняют повседневную деятельность докторов и жизнь пациентов? Что готовы предложить здравоохранению сегодня?

1. Предоперационная подготовка делает хирургию безопаснее.

Медицина, возможно, последняя индустрия с высоким уровнем риска, которая до сих пор не репетирует перед началом «игры». Пилоты отрабатывают взлеты и посадки на реалистичном симуляторе, футболисты проводят несколько предматчевых тренировок, где многократно прогоняют передачи и комбинации, которые помогут им забить мяч в ворота соперника во время игры. Тренировки в сфере здравоохранения проходят по принципу: увидел операцию один или несколько раз, провел такую же операцию самостоятельно, затем обучил другого специалиста. Таким образом, доктора практикуются на тех самых пациентах, которым оказывают медицинскую помощь. Как врачу оттачивать мастерство проведения сложнейших операций по удалению опухолей головного мозга, как репетировать операции при пороках сердца или редких детских заболеваниях (врожденной диафрагмальной грыже или гидроцефалии), когда ошибка может стать фатальной?

2. Экономия времени.

Скорость, высокая точность и возможность производства уникального для каждого пациента медицинского изделия – ключевые особенности технологий 3D-сканирования, моделирования и печати, которые позволяют оперативно создавать качественную медицинскую продукцию без повышения затрат, а за счет упрощения производственного цикла. Технология производства традиционных моделей слуховых аппаратов базируется на разработках второй половины XX века и заключается в заготовке мастером индивидуального корпуса по слепку слухового прохода пациента с помощью пресс-формы и многоэтапной ручной обработки. Длительный и трудоемкий процесс требует высокого мастерства и не исключает дополнительной работы мастера по подгонке корпуса под пациента. Теперь для подготовки индивидуального внутриушного слухового прибора вместо 12 этапов требуется всего 4, вместо 3 дней – 4 часа.

Будущее 3D-принтеров.

Теперь попробуем представить будущее 3D-принтеров. Здесь есть несколько важных моментов, на которые следует обратить внимание. Ниже наиболее вероятные сценарии будущего 3D-принтеров. Повышение надежности и качества приборов. Наверняка, этого с нетерпением ждут многие пользователи, ведь большинство существующих моделей 3D-принтеров не могут похвастаться бесперебойной работой и отсутствием погрешностей при печати. *Масштабное распространение.* Совершенно определено, что будущее 3D-принтеров порадует нас их популяризацией. Даже сейчас можно наблюдать растущую тенденцию к применению 3D-печати практически во всех сферах промышленности. Параллельно с тем, что все больше пользователей узнают о возможностях технологии, растет и спрос на настольные 3D-принтеры. *Доступность.* В продолжение предыдущего пункта стоит заметить, что растущий спрос на 3D-принтеры приведет к снижению цен на эти устройства. Применение 3D-печати в бытовых целях набирает обороты, что выводит на рынок новых производителей оборудования. Естественно, такой шаг повлечет за собой удешевление устройств; Увеличение области построения. 3D-печать крупногабаритных объектов давно занимает умы разработчиков. Конечно, это касается промышленных 3D-принтеров, ведь функциональность 3D-печати при таком масштабе позволит создавать полноценные компоненты, к примеру, автомобилей и самолетов.

Список литературы

1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://yandex.by/turbo?text=https%3A%2F%2F3ddevice.com.ua%2Ffaq-voprosy-i-otvety-o-3d-printerakh%2Fbudushchee-3d-pechati%2F>.
2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://3dtoday.ru/wiki/3Dprinter>.
3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://3dlab.clinic/news/preimusestva-primeneniya-3d-tehnologij-v-medicine>.
4. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.electronshtik.ru/news/show/4210>.
5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://medicalinsider.ru/meditsinskaya_tekhnika/3d-tehnologii-tomografiya-i-modelirovaniya-v-medicine/.
6. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://promdevelop.ru/3d-tehnologii-v-stroitelstve-i-proektirovanii/>.
7. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://make-3d.ru/articles/primeneniya-3d-pechati-v-stroitelstve/>.
8. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://scientifically.info/news/2014-05-28-2769>.
9. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://3d-daily.ru/technology/futurists-3dprint.html>.
10. Зеннaro, М. Доступная 3D-печать для науки, образования и устойчивого развития / М. Зеннaro, Э. Канессa, К. Фонда ; пер. с англ. – М. : МЦТФ, 2013.

The device, the principle of operation and the scope of application of 3D technologies in various spheres of life. The main areas of application of 3D technologies, their advantages over other methods of production of life support items. the areas of medicine, construction, space and further development of 3D technologies were touched upon.

Раней Андрей Геннадьевич, студент физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, lenovo3.0e1@gmail.com.

Научный руководитель – *Комар Владимир Николаевич*, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой электротехники и электроники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

УДК 621.373

А. О. РОМАШКЕВИЧ

ИОННЫЙ ВЕТЕР В СВЕРХЛЁГКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ

Разрабатывается бесшумный беспилотный летающий аппарат, представленный в виде самолета (ионоплана). Полет аппарата осуществляется за счет силы тяги ионного ветра, который образуется благодаря эффекту Бифельда – Брауна.

В настоящее время широко используются беспилотные летательные аппараты или по-другому дроны (квадрокоптеры, беспилотники), сфера применения которых достаточно высокая. Данные устройства очень шумные, что в свою очередь способствует увеличению акустического засорения воздушного пространства. Зачастую дроны используются с целью фото и видео съёмки, это может послужить для создания эффектных видео и фото. Но использование для простого видео мониторинга местности с целью разведки, охраны либо слежки за объектом очень затруднительно так как подобные дроны легко выдают свои позиции из-за собственного шума. Так же данные устройства не позволяют вести запись видео с естественными звуками исходящего от объекта съёмки. К тому же дроны работают за счет сложной электроники и вращающихся частей двигателя которые изнашиваются и выходят из строя, а это влечет за собой значительные финансовые затраты на покупку сменных частей и ремонт.

Основной причиной шума в рабочем дроне это вращающийся с помощью электродвигателя пропелер который вращаясь «взбивает», своими лопастями окружающий его воздух.

Решение данной проблемы может послужить использование летательных аппаратов, работающих за счет бесшумной ионной тяги (ионолеты, ионопланы).

Так как данные устройства не издадут посторонних звуков их сложнее обнаружить, вследствие этого они способны более качественно выполнять свою задачу мониторинга местности.

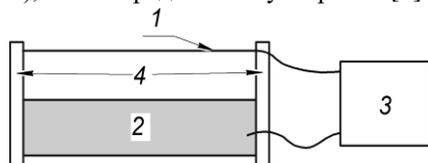
Исследователи из Массачусетского технологического института (МТИ) показали, что ионные двигатели, могут быть гораздо более эффективным источником реактивной тяги, чем традиционные. В ходе экспериментов в МТИ ионный ветер создавал тягу 110 ньютонов на киловатт, тогда как для топливного реактивного двигателя этот показатель – в 55 раз меньше [1].

В данной работе представлена разработка беспилотного летающего аппарата, представленного в виде самолета летающего за счет силы тяги ионного ветра. Ионный ветер образуется благодаря эффекту Бифельда – Брауна.

Явление основано на коронном разряде в сильных электрических полях, что приводит к ионизации атомов воздуха вблизи острых и резких граней. Обычно используется пара из двух электродов (рисунок 1), один из которых тонкий или острый – эмиттер, вблизи которого напряженность электрического поля максимальна и может достигать значений, вызывающих ионизацию воздуха, и более широкий с плавными гранями –

коллектор (в т. н. лифтерах обычно используется тонкая проволока и металлическая фольга, соответственно). Явление происходит при напряжении между электродами в десятки киловольт, вплоть до мегавольт [2].

Наибольшая эффективность явления достигается при напряжениях порядка 1 кВ на 1 мм воздушного зазора между электродами, то есть при напряженностях электрического поля чуть ниже, чем начало электрического пробоя воздушного зазора. Если между электродами возникает пробой, обычно в виде шнурового разряда, эффект пропадает (так как разряд сам превращает газ в ионы и напряжение на электродах равно падению напряжения на разряде). Вблизи тонкого электрода возникает ионизация атомов воздуха (кислорода в случае отрицательного напряжения на этом контакте, азота в случае положительного). Полученные ионы начинают двигаться к широкому электроду, сталкиваясь с молекулами окружающего воздуха и отдавая им часть своей кинетической энергии, либо превращая молекулы в ионы (ударная ионизация), либо передавая им ускорение [2].



1 – тонкий ионизирующий электрод (эмиттер),
2 – широкий электрод (коллектор), 3 – высоковольтный блок питания, 4 – каркас из диэлектрика, устанавливающий межэлектродный промежуток

Рисунок 1 – Асимметричный конденсатор

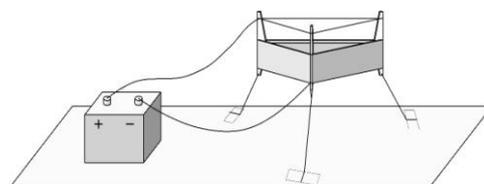


Рисунок 2 – Классическая модель парящего ионолёта

Создаётся поток воздуха от тонкого электрода к широкому, которого оказывается достаточно, чтобы поднять в воздух лёгкую летающую модель, которую называют лифтером или ионолётом (рисунок 2), что нередко используется для эффектных научных представлений. Возникающая сила тяги:

$$F = \frac{Id}{k}, \quad (1)$$

где I – ток между электродами, d – ширина диэлектрического зазора и k – подвижность ионов данного типа в данной среде [2].

Самолет на ионной тяге будет представлять собой секцию из параллельных друг другу электродных крыльев, каждое из которых будет расположено в одной плоскости вслед за предыдущим (рисунок 3). В отличие от традиционного самолета, тяга которого осуществляется за счет несущих винтов и турбин, каждый участок поверхности электродных крыльев ионолета участвует в образовании несущей силы. Также следует отметить, что аппарат не нуждается в механизмах для движения и управления. Управление будет выполняться за счет изменения силы тяги на участках крыльев.

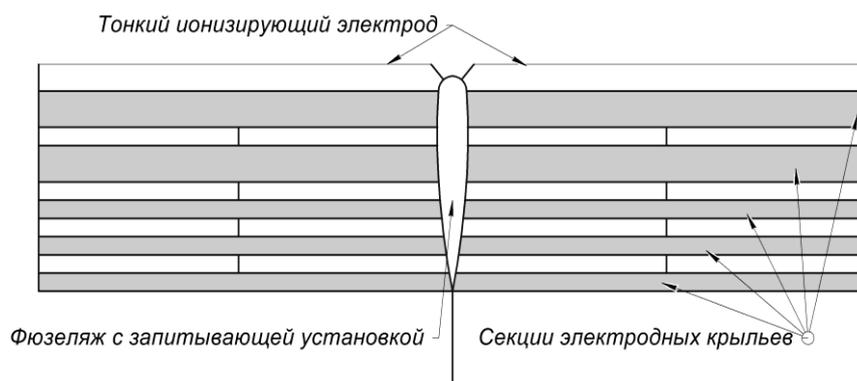


Рисунок 3 – Предполагаемое схематическое изображение ионоплана (вид сверху)

В целом готовый беспилотный летательный аппарат представляет собой платформу, которую можно оснастить легкими приборами к примеру видео и фотосъёмки.

Самолет, оснащенный электрокинетической двигательной установкой, основанной на системе Таунсенда Брауна, обладает многими очень интересными характеристиками, такими как:

- сниженное аэродинамическое сопротивление;
- увеличение времени полета и, следовательно, дальности полета;
- отсутствие подвижных поверхностей управления (элероны, руль направления и высоты) и, следовательно, отсутствие поверхностей, которые отражают радиолокационные волны;

- высокая маневренность (адаптивная огибающая полета) благодаря управлению ламинарным потоком;
- полный бесшумный полет;
- почти нулевая тепловая сигнатура;
- использование генератора электроэнергии и, следовательно, отсутствие горючего топлива;
- способность рассеивать электромагнитные волны и скрытность [3].

Высока вероятность того, что готовый аппарат, в дальнейшем, будет модернизироваться, путем внесения корректив и уменьшения массогабаритных характеристик для БПЛА. Будет рассматриваться возможность увеличения грузоподъемности аппарата и вертикальный полет.

Данный летательный аппарат может послужить отправной точкой развития новой авиации. В ходе экспериментов в Массачусетском технологическом институте ионный ветер выдавал тягу 110 ньютонов на киловатт, в 55 раз превышая данный показатель для топливного реактивного двигателя, этот факт дает надежду на перспективную электрификацию авиатранспорта в будущем [1].

Должен отметить и тот факт, что сейчас начнут и в будущем активно использоваться дирижабли. Эти воздушные судна энергетически очень выгодны и в будущем их применение будет только увеличиваться. На данный момент существуют и беспилотные дирижабли, которые имеют большой запас хода. На мой взгляд, эффект Бифельда – Брауна может сыграть значительную роль в развитии этого вида авиации.

Одной из основных задач является поиск оптимальной конструкции асимметричного конденсатора. Кроме источника питания на образование силы тяги ионного ветра, как же влияет и правильность конструкции конденсатора. В ходе исследования, проанализированы некоторые литературные источники и проведены опыты.

Оптимизация межэлектродного промежутка. Тяга рассчитывается путем изменения d от 30 мм до 1 м. Результирующее соотношение тяги / мощности к расстоянию между электродами указаны на графике (рисунок 4) [4].

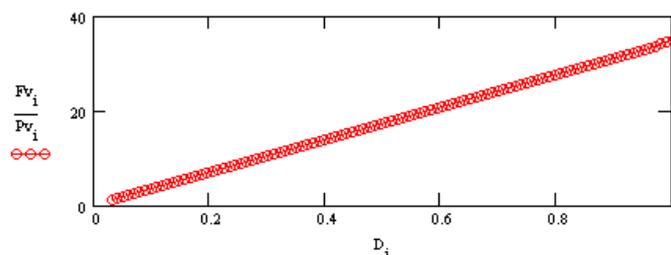


Рисунок 4 – Зависимость соотношения тяги / мощности к межэлектродному промежутку [4].

Существенным результатом является то, что соотношение тяги / мощности увеличивается пропорционально расстоянию и может достигать огромных значений, как 40 г / Вт. Однако абсолютная тяга быстро уменьшается с расстоянием (рисунок 5) [4].

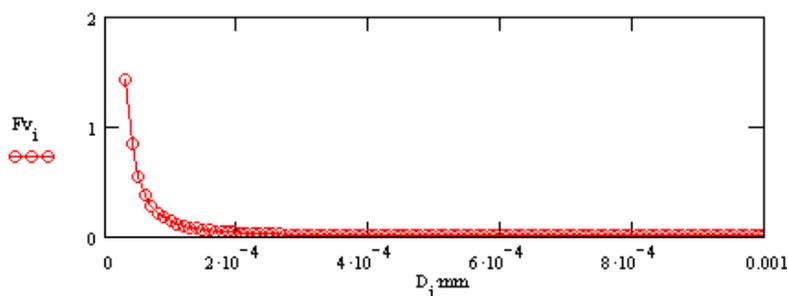


Рисунок 5 – График зависимости силы тяги к межэлектродному промежутку [4]

Из формулы (1) видно, что сила тока в межэлектродном промежутке обратно пропорциональна расстоянию между электродами, в связи с этим при увеличении расстояния между электродами сила тока начинает практически резко снижаться. Падение тока приводит к уменьшению силы тяги, образованной ионным ветром.

Тем не менее, абсолютная тяга может быть увеличена удлинением провода и коллектора. Поэтому увеличение расстояния дает четкий путь практически неограниченного повышения эффективности [4].

Оптимизация радиуса коронирующей проволоки. Радиус проволоки изменялся с 0,015 мм до 1,5 мм. Результирующее соотношение тяги / мощности приведены на графике (рисунок 6) [4].

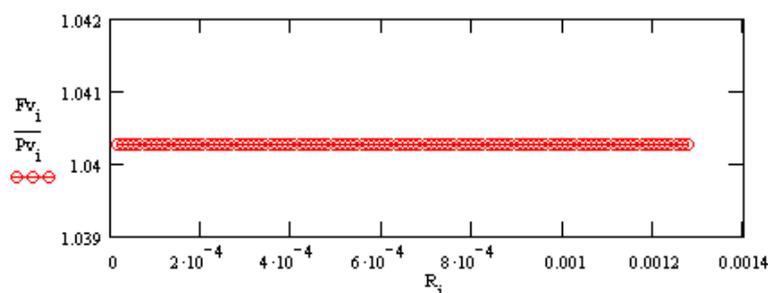


Рисунок 6 – График зависимости отношения тяги / мощности к радиусу коронирующего провода [4]

Как видно эффективность не меняется, а тяга меняется. На графике (рисунок 7) показана зависимость абсолютной тяги и радиуса [4].

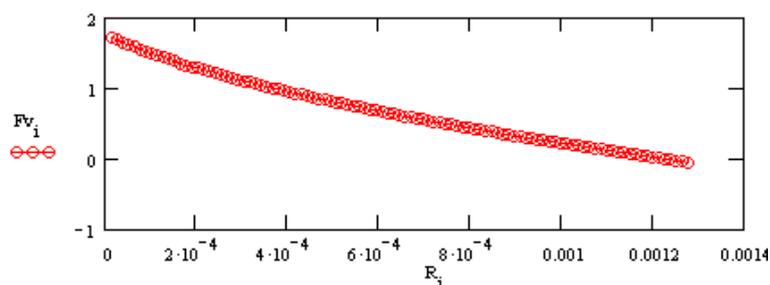
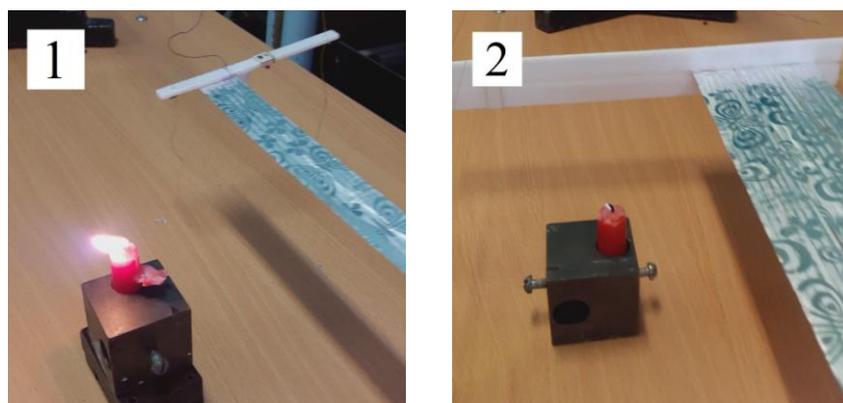


Рисунок 7 – График зависимости отношения тяги к радиусу коронирующего провода [4]

С уменьшением радиуса тяга сильно увеличивается, не теряя эффективности [4].

Оптимизация путем уширения коллектора. Собственные исследования подтвердили тот факт, что в асимметричном конденсаторе сила тяги увеличивается еще и за счет уширения коллектора. Опыт был проведен с использованием коронирующего электрода и уширенного коллектора. Электроды, длиной 250 мм, были расположены в одной плоскости. Ионизирующий электрод выполнен из тонкой проволоки сечением 0,2 мм. Коллектор был уширен с 25 мм до 75 мм. Сам конденсатор был подвешен на легких нитях и при подключении его к высокому напряжению, отклонялся под действием приложенной силы тяги ионного ветра. Увеличением силы тяги подразумевается увеличение скорости потока ионного ветра. На рисунке видно, как в случае 1, применив коллектор с шириной 25 мм, пламя свечи заметно отклоняется под действием ветра, а в случае 2, используя коллектор с шириной 75 мм, скорость потока ветра увеличивается и практически задувает пламя свечи. При дальнейшем уширении электрода заметного увеличения тяги больше не наблюдалось.

Из опыта следует, что уширение коллектора позволяет создавать более широкие электродные крылья для горизонтально летающего аппарата.



1 – использование коллектора шириной 25 мм, 2 – использование коллектора шириной 75 мм

Рисунок 8 – Увеличение тяги с помощью уширения коллектора

Выводы:

1. Увеличение расстояния между проволокой и коллектором путем одновременного увеличения длины проволоки и коллектора может позволить достичь отношения тяги к мощности до 40 г / Вт [4].

2. Уменьшение радиуса проволоки увеличивает тягу без ухудшения соотношения тяги и мощности [4].
3. Уширение коллектора позволяет достичь увеличения тяги и может упростить производство крыла для ионоплана.

Список литературы

1. Chu, Jennifer. A mighty wind / Jennifer Chu // MIT News Office [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: <http://news.mit.edu/2013/ionic-thrusters-0403>. – Дата доступа: 02.03.2020.
2. Эффект Бифельда – Брауна // Википедия, свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – 2020. – Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Эффект_Бифельда_–_Брауна. – Дата доступа: 02.03.2020.
3. Applications: UAV, MAV, VTOL-Crafts // JLN Labs web site dedicated to the search of Free-Energy solutions and new generation of space-propulsion systems [Электронный ресурс]. – 2020. – Режим доступа: <http://jnaudin.free.fr/lifters/vtol.htm>. – Дата доступа: 02.03.2020.
4. Barsoukov, Evgenij. Force / Power optimization / Evgenij Barsoukov // Lifter theory [Электронный ресурс]. – 2002. – Режим доступа: http://sudy_zhenja.tripod.com/lifter_theory/Force.htm. – Дата доступа: 02.03.2020.

A quiet unmanned aerial vehicle is being developed, presented in the form of an airplane (ion-plane). The flight of the device is carried out due to the thrust force of the ion wind, which is formed due to the Biefeld – Brown effect.

Ромашкевич Андрей Олегович, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, newromand@gmail.com.

Научный руководитель – *Тарковский Викентий Викентьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, зам. декана физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, tarkovsky@grsu.by.

УДК 528.8

М. И. СОБОВАЯ, М. Н. КОВАЛЕНКО, А. А. МИНЬКО

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «СпектроТест»

Описывается разработанный аппаратно-программный комплекс (АПК) «СпектроТест». АПК покрывает спектральный диапазон 0,3–1,1 мкм и позволяет измерять характеристики спектральной чувствительности фотоприемников (фотодиодов) различного типа. Программное обеспечение комплекса регистрирует спектры с помощью эталонного и исследуемого фотоприемников и пересчитывает полученные результаты в нормированную спектральную характеристику.

В настоящее время практически во всех отраслях промышленности используется оптическая измерительная техника. Основным элементом, определяющим спектральный диапазон измерений и их чувствительность, является фотоприемник. Конечно, при необходимости можно приобрести и использовать сертифицированный фотоприемник или заказать работы по его сертификации. Отсюда задача создания специализированных и взаимосвязанных рабочих и эталонных средств измерений и поверочного оборудования для различных параметров и величин как самих систем, так и их элементов; широким применением и массовостью контролируемой продукции, достаточно жесткими требованиями к измеряемым параметрам в совокупности с постоянной тенденцией уменьшения погрешностей из-за отставания отечественной измерительной техники от потребностей практики. Это вынуждает производить импортные закупки не только самих систем, но и соответствующего контрольно-измерительного оборудования, что нарушает метрологическую безопасность при использовании систем.

К примеру, при разработке новых типов полупроводниковых фотоприемных устройств и организации их производства (АО «Интеграл») возникает необходимость в использовании собственной аппаратуры для спектральной калибровки исследуемых фотоприемников.

В работе описан разработанный на кафедре физической оптики и прикладной информатики БГУ аппаратно-программный комплекс (АПК), позволяющий проводить спектральную калибровку полупроводниковых фотоприемников сличением их чувствительности с чувствительностью эталонного фотоприемника (методика калибровки МК-М4-05-2010) [1].

Метод эталонной калибровки заключается в прямом сравнении калибруемого фотоприемника с эталоном. Он позволяет измерить относительную спектральную чувствительность калибруемого фотоприемника на дискретном наборе точек спектрального диапазона [2].

Для эталонного и исследуемого фотоприемника одновременно измеряются фототоки на фиксированном наборе длин волн с известной спектральной шириной выходной щели:

$$I(\lambda) = K(\lambda)S(\lambda)A(\lambda)$$

где $I(\lambda)$ – фототок эталонного приемника, $K(\lambda)$ – аппаратная функция спектрометра, $S(\lambda)$ – спектральная чувствительность эталонного фотоприемника, $A(\lambda)$ – спектральная характеристика излучения источника.

$$I_x(\lambda) = K(\lambda)S_x(\lambda)A(\lambda)$$

где $I_x(\lambda)$ – фототок, $K(\lambda)$ – аппаратная функция спектрометра, $S_x(\lambda)$ – спектральная чувствительность фотоприемника, $A(\lambda)$ – спектральная характеристика излучения источника.

Спектральная чувствительность эталонного приемника известна и содержится в сертификате на него. Таким образом, поделив измеренные фототоки, получим относительную чувствительность

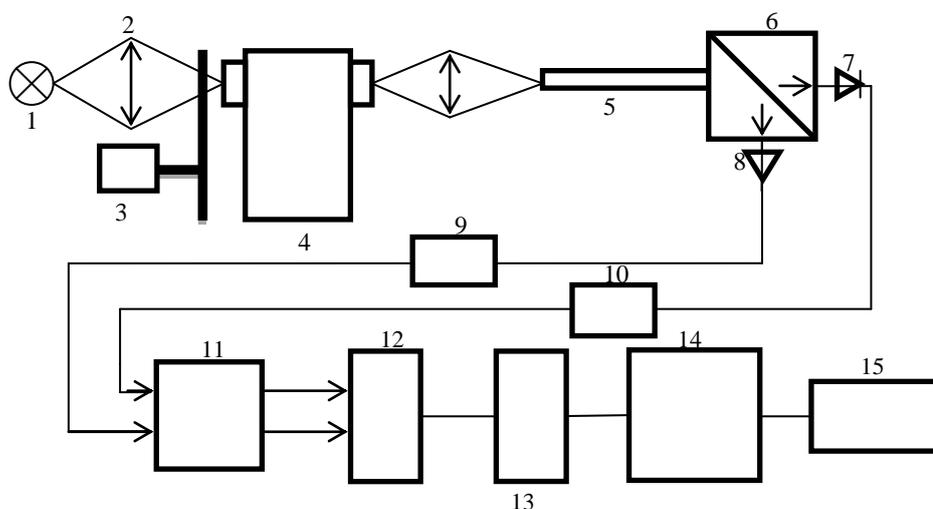
$$\frac{I_x(\lambda)}{I(\lambda)} = \frac{S_x(\lambda)}{S(\lambda)} = i(\lambda)$$

Затем умножив известную спектральную чувствительность эталонного приемника на результат деления значений фототока, мы получаем спектральную чувствительность исследуемого приемника.

$$S_x(\lambda) = S(\lambda) * i(\lambda)$$

где $S_x(\lambda)$ – спектральная чувствительность исследуемого фотоприемника, $S(\lambda)$ – известная спектральная чувствительность эталонного фотоприемника.

Для реализации нашего метода была предложена схема построения аппаратно-программного комплекса и представленная на рисунке 1.



1 – галогенная лампа накаливания, 2 – собирающая линза, 3 – модулятор с частотой модуляции 177 Гц, 4 – монохроматор, работающий в диапазоне 300–1100 нм, с дисперсией 5 нм/мм, 5 – оптическое волокно, 6 – светоделительный кубик, 7 – эталонный фотодиод, 8 – исследуемый фотодиод, 9, 10 – аналого-цифровые преобразователи, 11 – цифровой двухканальный фильтр, 12 – интерфейс Ethernet, 13 – компьютер, 14 – программное обеспечение для регистрации спектра, 15 – вывод графиков (EXCEL)

Рисунок 1 – Схема АПК

Принцип работы схемы. Спектральная чувствительность исследуемого фотодиода регистрируется с помощью механически перестраиваемого по длинам волн монохроматора, имеющего шаговый двигатель. При прохождении света, через спектрально неселективный светоделитель, 50 % света проходит через наклоненное под углом 45° зеркало на исследуемый фотодиод, а 50 % отражается под углом 90° на эталонный. Регистрация сигналов с фотоприемников происходит с помощью аналого-цифровых преобразователей. Для уменьшения собственных шумов приемно-усилительного тракта использовалась цифровая фильтрация сигналов с АЦП, на

частоте модуляции, которая задается модулятором. Зарегистрированные данные попадают в компьютер, с помощью Ethernet интерфейса. Прибором управляет программа nVision, с которой, после регистрации спектра, данные передаются в EXCEL, где обрабатываются описанным ранее методом.

На основании этой схемы нами был изготовлен аппаратно-программный комплекс (АПК) «СпектроТест» для измерения относительных спектральных характеристик фотоприемников, который будет использоваться для измерения вновь создаваемых фотоприемников в рамках работ, проводимых в ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника».

Основные технические характеристики разработанного комплекса:

1. Спектральный диапазон 300–1200 нм.
2. Выделяемый спектральный интервал – фиксированный 2,5 нм.
3. Абсолютная погрешность установки длины волны – не более $\pm 0,5$ нм.
4. Уровень мешающего излучения – не более 0,05 % (на длине волны 350 нм).
5. Система регистрации – цифровая фильтрация для качественного подавления собственных шумов приемников излучения и возможных фоновых засветок. В состав прибора входит модулятор оптического излучения и цифровой КИХ – фильтр 1024 порядка.
6. Опорный канал на фотодиоде с калиброванной спектральной чувствительностью работает на 50 % основного пучка и подключен все время.

В качестве эталонного фотоприемника был взят фотодиод, откалиброванный ФГУП «ВНИИОФИ» по методу калибровки МК-М4-05-2010 «Фотоприемники». Сертификат, прилагаемый к фотодиоду, содержит набор абсолютных данных о спектральной чувствительности в диапазоне 350–1100 нм.

Были проведены экспериментальные измерения для двух диодов: кремниевого и германиевого. Результат измерений автоматически экспортируется в Excel, в котором производится расчет спектральной чувствительности исследуемых фотоприемников.

Результаты проведенных исследований представлены на рис. 2 (спектральная чувствительность эталонного фотодиода), на рис. 3 (относительная чувствительность германиевого и кремниевого фотодиодов).

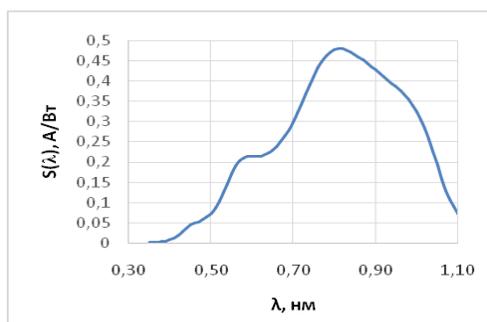


Рисунок 2 – Спектральная чувствительность эталонного фотоприемника

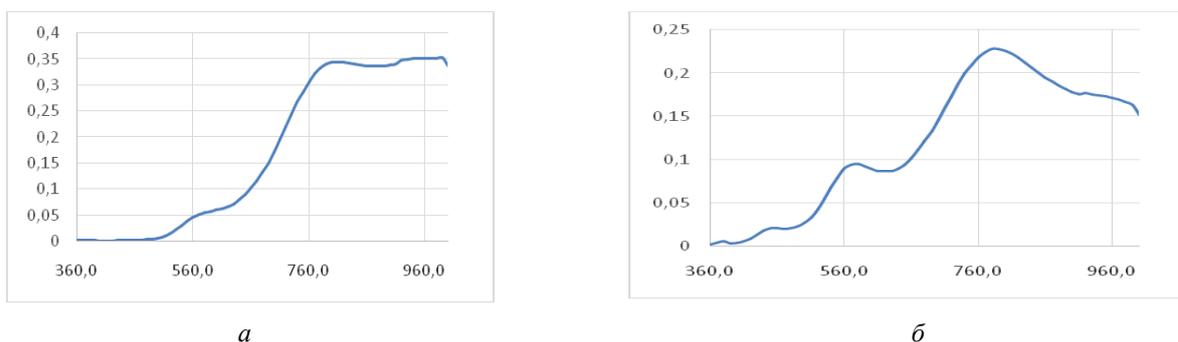


Рисунок 3 – Относительная спектральная чувствительность опытных фотодиодов:
а – германиевого фотоприемника; б – кремниевого фотоприемника

Выводы

1. Изготовленный нами аппаратно-программный комплекс (АПК) «СпектроТест» с системой регистрации на основе двухканального цифрового фильтра позволяет проводить спектральную калибровку полупроводниковых фотоприемников сличением их чувствительности с чувствительностью эталонного фотоприемника (методика калибровки МК-М4-05-2010) [1].

2. В программном обеспечении комплекса реализована методика эталонной калибровки спектральной чувствительности, которая заключается в прямом сравнении калибруемого фотоприемника с эталоном. Она позволяет измерить относительную спектральную чувствительность калибруемого фотоприемника на дискретном наборе точек спектрального диапазона.

3. С помощью аппаратно-программный комплекс (АПК) «СпектроТест» получены результаты измерения спектральной чувствительности опытных фотодиодных приемников.

Список литературы

1. Методика калибровки МК-М4-05-2010.
2. Москалев, В. А. Теоретические основы оптико-физических исследований / В. А. Москалев. – Л. : Машиностроение, 1987. – 312 с.

The paper describes the developed hardware and software complex (APK) «SpectroTest». The APC covers a spectral range of 0,3–1,1 microns and allows measuring the spectral sensitivity characteristics of photodetectors (photodiodes) of various types. The software of the complex registers the spectra using reference and experimental photodetectors and recalculates the obtained results into a normalized spectral characteristic.

Собовая Мария Ивановна, студентка 3 курса физического факультета (кафедра физической оптики) Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.

Научные руководители – *Коваленко Максим Николаевич*, заведующий лабораторией спектроскопических систем физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, kovalenkom@bsu.by.

Минько Анатолий Антонович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физической оптики и прикладной информатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.

УДК 621.373.826:533.9

А. Ю. ХОМЧИК

ВЛИЯНИЕ ЗАДЕРЖКИ МЕЖДУ ИМПУЛЬСАМИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЛАЗЕРНО-ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЫ БРОНЗЫ

Проведено исследование влияния задержки между импульсами на интенсивность спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы бронзы. Показано, что максимальной интенсивности спектральные линии меди Cu I (324,7 нм), Cu I (327,4 нм) достигают при задержках между лазерными импульсами в 1 мкс и 8 мкс.

Бронза – это цветной сплав в основе которого лежит медь. В состав бронзы входят также свинец, алюминий, олово, бериллий, марганец, и другие элементы. Количество чистой меди, содержащейся в составе бронзы, оказывает влияние не только на технологические и эксплуатационные характеристики изделия, но и на цвет его поверхности. Так, изделия из наиболее распространенных марок бронзовых сплавов, в составе которых около 85 % меди, отличаются золотистым цветом. Если количество меди уменьшить до 50 %, то по итогу может получиться бронза белого цвета, схожая по цвету с серебром. При желании может быть получена серая и даже черная бронза – такого результата можно добиться, если уменьшить количество меди в составе сплава до 35 % и ниже. Бронзы, в составе которых, кроме меди, содержится кремний и цинк, отличаются повышенной текучестью в расплавленном состоянии, поэтому их используют преимущественно для производства сложных деталей методом литья. Отличительным свойством бронз данного типа является и то, что при механическом воздействии на изделия, которые из них изготовлены, не возникает искрообразование. Такое свойство материала бывает очень важным во многих случаях.

Сплавы бронзы на сегодняшний день активно применяются в различных отраслях, таких как машиностроение, авиастроение, судостроение, в производстве бумаги и типографии, нефтегазовой и горнодобывающей промышленности и т. д. Современная промышленность выпускает достаточно много марок бронзы, отличающихся своим химическим составом, и, соответственно, характеристиками и областью применения. Огромное значение в промышленности имеет контроль состава бронзы. Поскольку от состава готового изделия будут зависеть его эксплуатационные свойства [1–5].

Если провести сравнение с латунью, то бронза характеризуется более высокой коррозионной стойкостью, прочностью и антифрикционными свойствами. Она довольно стойкая на воздухе, в соленой воде, углекислых

растворах и растворах многих органических кислот. Большинство видов бронзы поддается сварке и пайке твердыми и мягкими припоями.

Современное производство не может обходиться без знания состава различных материалов, веществ и изделий которые являются объектами деятельности человека. Основные требования, предъявляемые к методам анализа материалов, – это точность, воспроизводимость и экспрессность. Поскольку чисто химические методы не всегда отвечают этим требованиям, широкое внедрение получили физические и физико-химические методы. Среди этих методов одно из важнейших мест занимает лазерный спектральный анализ [1] и, в частности, лазерно-эмиссионный спектральный анализ [2–7].

При количественном лазерно-эмиссионном спектральном анализе расчеты проводятся на основании величин интенсивностей используемых в аналитических целях спектральных линий. Огромное влияние на достоверность результатов оказывают параметры лазерного излучения формирующего плазму (длительность и энергия импульсов, задержка между ними при двухимпульсном формировании плазмы и т. д.) и положение исследуемого объекта относительно фокуса (расфокусировка) [8–9].

Как указано в работах [2; 3; 10] лазерно-эмиссионный спектральный анализ по сравнению с традиционными спектральными эмиссионными методами обладает рядом преимуществ:

- С помощью этого метода возможен анализ элементного состава образцов, находящихся в различных агрегатных состояниях – твердом, жидком, газообразном.

- Образцы могут быть диэлектриками и проводниками, это несущественно с точки зрения возникновения и генерации лазерной плазмы.

- Малый размер зоны воздействия лазерного излучения (вплоть до 100 мкм) позволяет проводить локальный контроль элементного состава и определять профиль распределения элементов по поверхности образца.

- Из-за небольшого объема испаряемого вещества для анализа требуются весьма малые количества образца.

- Не требуется предварительная подготовка пробы, образцы могут быть любой формы, состояние поверхности не имеет значения.

- Атомизация образца и генерация источника аналитического сигнала (лазерной плазмы) – одностадийный процесс.

- Многократное воздействие лазерного излучения в одну и ту же точку поверхности обеспечивает проведение послойного анализа.

Целью настоящей работы является определение величин задержек между сдвоенными лазерными импульсами при которых наблюдаются максимальные значения интенсивности спектральных линий, обеспечивающих воспроизводимость экспериментальных результатов и минимальную погрешность измерений количественного состава методом лазерно-эмиссионной спектроскопии при двухимпульсном формировании лазерно-эмиссионной плазмы на поверхности бронзы.

Исследования проводились на модернизированной установке, которая описана в [10; 11]. Излучение YAG:Nd³⁺-лазера, с длительностью импульсов ~15 нс, фокусирующей системой направлялось на исследуемый объект расположенный в ее фокусе. YAG:Nd³⁺-лазер мог работать как в режиме одиночных, так и в режиме сдвоенных импульсов, следующих с регулируемой задержкой друг относительно друга. Под воздействием лазерного излучения на исследуемом объекте образовывалась лазерно-эмиссионная плазма, излучение и спектры, которой регистрировались. Регистрация спектров осуществлялась в направлении, близком к обратному по отношению лазерному лучу, формирующему плазму. Излучение плазмы, собранное объективом с помощью оптико-механического блока фокусировки и сбора излучения, вводилось в световод и направлялось в монохроматор-спектрограф MS 2004i, где происходило выделение исследуемых спектральных линий. Регистрация эмиссионного спектра лазерной плазмы исследуемого объекта на выходе монохроматора-спектрографа осуществлялось с помощью регистратора оптического излучения UC-16H10420-1106 на базе ПЗС-линеек с размером светочувствительной зоны 28,672×0,896 мм. Эксперименты проводились в воздушной среде. Полученные данные обрабатывались, усреднялись и отображались в виде спектра в компьютерной программе Qsp Client автоматически.

На рисунках 1 и 2 представлены зависимости интенсивности спектральных линий меди и никеля от времени задержки между спаренными лазерными импульсами. Исследовался диапазон задержек 0–10 мкс (рисунок 1) и 10–300 мкс (рисунок 2). Энергия импульсов лазерного излучения составляла 30 мДж.

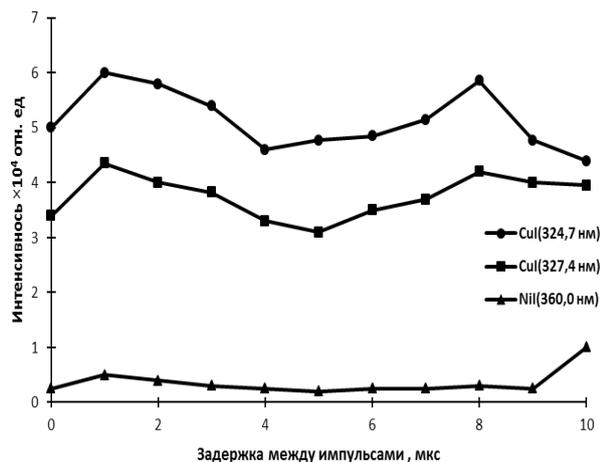


Рисунок 1 – Зависимости интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы бронзы от задержки между импульсами в диапазоне 0–10 мкс

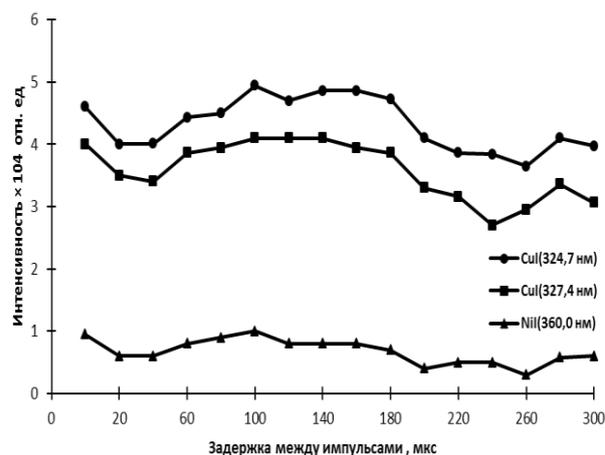


Рисунок 2 – Зависимости интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы бронзы от задержки между импульсами в диапазоне 10–300 мкс

В зарегистрированных спектрах были выбраны наиболее интенсивные линии меди Cu I (324,7 нм), Cu I (327,4 нм) и никеля Ni I (360,0 нм). Из рисунка 1 видно наличие двух экстремумов, в которых значения интенсивности спектральных линий меди максимальны. Максимумы интенсивности спектральных линий приходятся на задержки между лазерными импульсами в 1 мкс и 8 мкс. При увеличении задержки от 1 мкс до 8 мкс интенсивность анализируемых спектральных линий падает до 1,5 раза. При задержке в 5 мкс наблюдается минимум интенсивности. Далее идет плавный рост интенсивности и при задержке равной 8 мкс наблюдается второй максимум интенсивности. Далее снова идет ее спад.

Из рисунка 2 видно, что при задержках от 10 до 300 мкс интенсивность спектральных линий ведет себя неоднозначно. При значениях задержки 10–20 мкс наблюдается спад интенсивности, в диапазоне от 20 до 100 мкс наблюдается рост, а затем до значения задержки в 180 мкс интенсивность практически не меняется. Затем идет спад, и в точке с задержкой равной 240 мкс наблюдается минимум интенсивности у линии Cu I (327,4 нм), а в точке с задержкой равной 250 мкс минимум интенсивности у линии Cu I (324,7 нм).

Анализ поведения наиболее интенсивной в исследованном спектральном диапазоне линия никеля Ni I ($\lambda_1 = 360,0$ нм) показывает, что при задержках от 1 до 9 мкс она остается практически неизменной. Однако при задержке в 10 мкс наблюдается наличие незначительного экстремума, в котором значения интенсивности максимальна.

Таким образом, как следует из рисунков 1 и 2, интенсивность спектральных линий меди достигает максимального значения порядка $6 \cdot 10^4$ отн. единиц при задержках между лазерными импульсами в 1 мкс и 8 мкс.

Список литературы

- Скворцов, Л. А. Лазерные методы дистанционного обнаружения химических соединений на поверхности тел / Л. А. Скворцов. – М. : Техносфера, 2015. – С. 208.
- Кремерс, Д. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия / Д. Кремерс, Л. Радиемски. – М. : Техносфера, 2009. – 370 с.
- Попов, А. М. Использование лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии для анализа конструкционных материалов и объектов окружающей среды / А. М. Попов, Т. А. Лабугин, Н. Б. Зоров // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2, Химия. – 2009. – Т. 50, № 6. – С. 453–467.
- Ануфрик, С. С. Спектральный анализ элементного состава древесноволокнистой плиты / С. С. Ануфрик, К. Ф. Зноско, Н. Н. Курьян // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2015. – № 3 (199). – С. 83–92.
- Исследование химического состава глазурей керамических плиток / С. С. Ануфрик [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2016. – Т. 83, № 5. – С. 724–730.
- Белаш, В. Ч. Температура и концентрация электронов импульсного разряда в смеси паров ртути с аргоном / В. Ч. Белаш, К. Ф. Зноско // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2018. – Т. 8, № 3. – С. 83–92.
- Зноско, К. Ф. Распределение интенсивности излучения плазмы импульсно-периодического разряда в смеси паров ртути с аргоном / К. Ф. Зноско, В. Ч. Белаш // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2019. – Т. 9, № 1. – С. 78–89.

8. Ануфрик, С. С. Модификация химического состава и повышение износостойкости полуфриттовой глазури напольной керамической плитки путем добавления плавленного корунда / С. С. Ануфрик, Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, И. И. Жукова // Журн. Бел. гос. ун-та. Физика. – 2017. – № 2. – С. 83–94.

9. Воропай, Е. С. Зависимость интенсивности спектральных линий углерода от структуры железных сплавов при двухимпульсной лазерной абляции / Е. С. Воропай, К. Ф. Ермалицкая // Вестн. БГУ. – 2011 – № 2. – С. 10–13.

10. Ануфрик, С. С. Влияние плотности мощности лазерного излучения на интенсивность спектральных линий основных компонентов лазерной плазмы глины / С. С. Ануфрик, Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, М. В. Бельков // Журнал прикладной спектроскопии. – 2018. – Т. 85, № 2. – С. 285–292.

11. Курьян, Н. Н. Временная динамика свечения лазерно-эмиссионного факела глины / Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, В. В. Григуть // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2018. – Т. 8, № 2. – С. 101–110.

In this work, we study the effect of the delay between pulses on the intensity of the spectral lines of a laser-emission bronze plasma. It was shown that the spectral lines of copper Cu I (324,7 nm) and Cu I (327,4 nm) reach maximum intensity with delays between laser pulses of 1 μ s and 8 μ s.

Хомчик Артём Юрьевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, tema.homchik@gmail.com.

Научный руководитель – *Зноско Казимир Францевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, znosko@grsu.by.

УДК 621.373.826:533.9

А. Ю. ХОМЧИК

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЛАЗЕРНО-ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЫ БРОНЗЫ

Проведены исследования влияния энергии лазерных импульсов на интенсивность спектральных линий плазмы, сформированной на поверхности образца бронзы с помощью лазерного излучения. Показано, что с ростом энергии лазерных импульсов интенсивность исследуемых спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы бронзы возрастает.

Лазерно-эмиссионный анализ является одним из методов атомно-эмиссионного спектрального анализа, в котором используют спектры плазмы, сформированной на поверхности исследуемого объекта с помощью импульса лазерного излучения. Он применяется для анализа твёрдых образцов, жидкостей, газовых сред, взвешенной пыли и аэрозолей. Лазерная плазма является источником эмиссионного спектра атомов и ионов, находящихся в плазменном факеле. Регистрация спектрального состава излучения лазерной плазмы и измерение интенсивностей эмиссионных линий позволяет проводить идентификацию элементов и измерять их концентрацию [1–2].

В настоящее время лазерно-эмиссионный анализ бурно развивается. Это обусловлено возможностью создания универсальных спектрально-эмиссионных анализаторов, способных анализировать любые типы образцов с высоким пространственным разрешением по поверхности [3–4]. Лазерно-эмиссионный анализ относится к бесконтактным методам. Можно анализировать удалённые объекты без предварительной пробоподготовки. Использование коротких лазерных импульсов предельно упрощает процесс мгновенного испарения и ионизации вещества без влияния теплопередачи по объёму образца и экранирования лазерного излучения плазмой факела, так как формирование ее происходит уже после окончания лазерного импульса. Эти факторы улучшают воспроизводимость результатов анализа [5–6].

Лазерный эмиссионный спектральный анализ (LIBS) является одним из наиболее распространенных способов изучения состава сплавов металлов на производстве. Использование двойных лазерных импульсов в качестве источника возбуждения имеет ряд преимуществ перед стандартными источниками анализа лазерного излучения (например, относительная интенсивность спектральных линий элементов увеличивается в несколько раз без увеличения уровня фона). Однако распределение интенсивности линий в лазерной плазме, которая связана с неравномерным образованием элементов в плазменном факеле является все еще не до конца понято [7–8]. При разработке методов количественного анализа особенно важно учитывать влияние изменений параметров лазерного излучения (плотности потока излучения, количества импульсов на точку, временного интервала между двумя лазерными импульсами, и т. д.) об относительных интенсивностях спектральных линий разных элементов.

Целью настоящей работы является установление влияния энергии сдвоенных лазерных импульсов на интенсивность спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы сформированной на поверхности бронзы.

В качестве исследуемых объектов были взяты 3 образца бронзы неизвестного состава, марки которых были установлены в процессе исследования методом рентгено-флуоресцентного анализа. Результаты исследования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Элементный состав образцов бронзы

Хим. элемент	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3
Cu	99,33 %	91,33 %	97,13 %
Ni	0,57 %	-	-
Fe	-	0,03 %	2,41 %
Zr	-	0,19 %	0,25 %
Sn	-	8,44 %	-
Mn	-	-	0,20 %

Исследования проводились на модернизированной установке, которая описана в [9–10]. Исследования проводились при работе спектрометра в двухимпульсном режиме. Первый импульс формировал лазерно-плазменный факел, а второй его дополнительно возбуждал. Частота следования лазерных импульсов составляла 5 Гц. Энергия лазерного импульса равнялась 30 мДж. По исследуемым образцам производилось 5 серий импульсов при каждом измерении из Nd-YAG³⁺-лазера в разные участки исследуемого материала, после чего данные отображались в окне программы QSp Client. При задержке 0 мкс лазер работает в одноимпульсном режиме. Измерения были получены, когда средняя энергия лазера составляла 30 мДж.

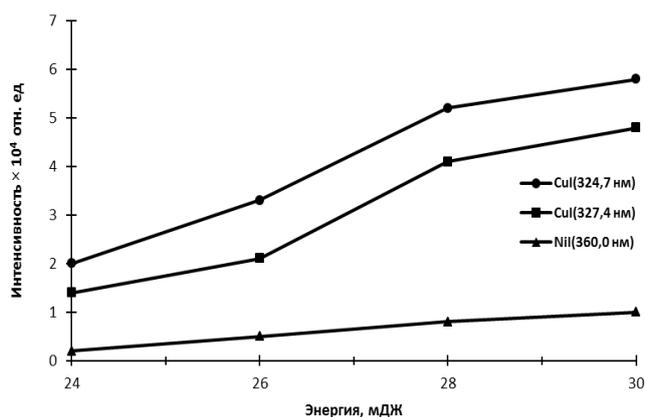


Рисунок 1

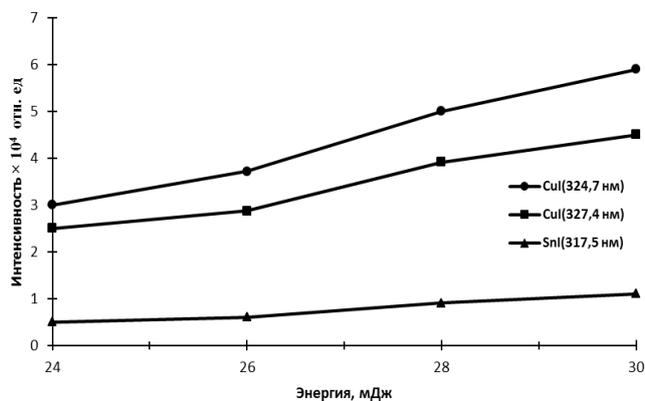


Рисунок 2

На рисунке 1 представлены зависимости интенсивности спектральных линий основных химических элементов образца бронзы № 1 от энергии лазерных импульсов. Из рисунка видно, что интенсивности спектральных линий зависят от энергии лазерного излучения. Также можно отметить, что при изменении энергии лазерных импульсов от 26 мДж до 28 мДж рост интенсивности спектральных линий меди происходил более значительно. Рост интенсивности спектральной линии никеля происходит линейно.

На рисунке 2 представлены зависимости интенсивности спектральных линий основных химических элементов образца бронзы № 2 от энергии лазерных импульсов. Из рисунка видно, что интенсивности спектральных линий зависят от энергии лазерного излучения практически линейно. Интенсивность линия олова увеличивается практически линейно, без скачков в большую или меньшую сторону.

На рисунке 3 представлены зависимости интенсивности спектральных линий основных химических элементов образца бронзы № 3 от энергии лазерных импульсов. Из рисунка видно, что интенсивности спектральных линий меди изменяются разнонаправленно при энергии импульсов больших 26 мДж. Интенсивность спектральной линии марганца остается прак-

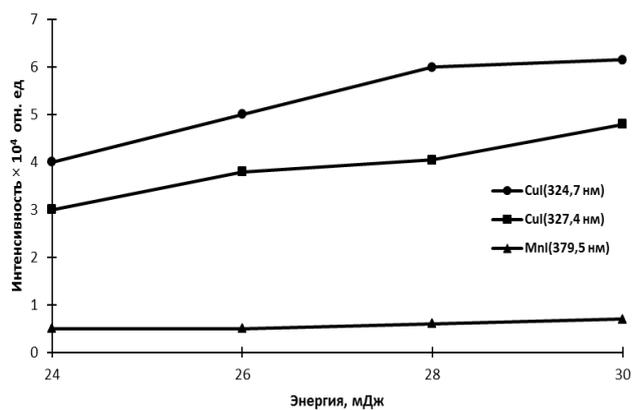


Рисунок 3

тически неизменной при росте энергии лазерных импульсов.

Из представленных на рисунках зависимостей видно, что интенсивность спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы сформированной на поверхности бронзы зависит от ее состава, т. е. от наличия тех или иных химических элементов в сплаве и, соответственно в плазме. От химического состава сплава также зависит динамика роста интенсивности спектральных линий с ростом энергии лазерных импульсов.

Таким образом, с ростом энергии лазерных импульсов интенсивность анализируемых спектральных линий химических элементов образцов бронзы возрастает. Рост энергии лазерных импульсов приводит к росту температуры лазерно-эмиссионной плазмы и росту интенсивности спектральных линий.

Список литературы

1. Ермалицкая, К. Ф. Двухимпульсная лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия стали, легированной титаном и цирконием / К. Ф. Ермалицкая, Н. С. Тарасюк, Е. С. Воропай, В. В. Углов // *Вестн. БГУ.* – 2010. – № 3. – С. 3–7.
2. Кремерс, Д. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия / Д. Кремерс, Л. Радиемски. – М. : Техносфера, 2009. – 370 с.
3. Попов, А. М. Использование лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии для анализа конструкционных материалов и объектов окружающей среды / А. М. Попов, Т. А. Лабутин, Н. Б. Зоров // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2, Химия.* – 2009. – Т. 50, № 6. – С. 453–467.
4. Ануфрик, С. С. Спектральный анализ элементного состава древесноволокнистой плиты / С. С. Ануфрик, К. Ф. Зноско, Н. Н. Курьян // *Вестн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне.* – 2015. – № 3 (199). – С. 83–92.
5. Ануфрик, С. С. Модификация химического состава и повышение износостойкости полуфриттовой глазури напольной керамической плитки путем добавления плавленого корунда / С. С. Ануфрик, Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, И. И. Жукова // *Журн. Бел. гос. ун-та. Физика.* – 2017. – № 2. – С. 83–94.
6. Исследование химического состава глазурей керамических плиток / С. С. Ануфрик [и др.] // *Журнал прикладной спектроскопии.* – 2016. – Т. 83, № 5. – С. 724–730.
7. Белаш, В. Ч. Температура и концентрация электронов импульсного разряда в смеси паров ртути с аргоном / В. Ч. Белаш, К. Ф. Зноско // *Вестн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне.* – 2018. – Т. 8, № 3. – С. 83–92.
8. Зноско, К. Ф. Распределение интенсивности излучения плазмы импульсно-периодического разряда в смеси паров ртути с аргоном / К. Ф. Зноско, В. Ч. Белаш // *Вестн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне.* – 2019. – Т. 9, № 1. – С. 78–89.
9. Ануфрик, С. С. Влияние плотности мощности лазерного излучения на интенсивность спектральных линий основных компонентов лазерной плазмы глины / С. С. Ануфрик, Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, М. В. Бельков // *Журнал прикладной спектроскопии.* – 2018. – Т. 85, № 2. – С. 285–292.
10. Курьян, Н. Н. Временная динамика свечения лазерно-эмиссионного факела глины / Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, В. В. Григуть // *Вестн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне.* – 2018. – Т. 8, № 2. – С. 101–110.

In this work, we study the effect of the delay between pulses on the intensity of the spectral lines of a laser-emission bronze plasma. It was shown that the spectral lines of copper Cu I (324,7 nm) and Cu I (327,4 nm) reach maximum intensity with delays between laser pulses of 1 μ s and 8 μ s.

Хомчик Артём Юрьевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, tema.homchik@gmail.com.

Научный руководитель – *Зноско Казимир Францевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, znosko@grsu.by.

А. Т. ЯДЕШКО

ПРОЕКТ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ООО «ПБН-ВОСТОК»

Рассмотрены такие понятия, как энергоэффективность и энергосбережение, затронута тема актуальности энергосбережения на предприятиях. Также перечислены пути решения проблемы неэффективности электроснабжения на предприятии, приведен пример эффективности одного из перечисленных путей решения.

Энергоэффективность – это эффективное (рациональное) использование энергетических ресурсов. Рациональное использование электрической энергии – важный момент в развитии любого предприятия и производстве продукции в нем. Соблюдая нормы по расходу ресурсов в производстве, экономится денежный ресурс, не позволяя предприятию стать экономически невыгодным.

Энергосбережение на предприятии является одной из самых актуальных проблем, с которой сталкивается промышленность. Это связано с постоянным ростом стоимости на электроэнергию и прочие энергоносители. Производства затрачивают свои финансы на сырьё и материалы, топливо, на эксплуатационные работы, но самым дорогим является оплата за энергетическую составляющую.

Энергосберегающие мероприятия, которые проводятся на предприятии позволяют значительно сократить затраты на энергоносители и тем самым положительно влиять на технико-экономические показатели работы предприятия или производства. Это сразу наблюдается в увеличении рентабельности и улучшении конкурентоспособности выпускаемой продукции за счет снижения себестоимости выпускаемой продукции или услуг.

Актуальность энергосбережения на предприятии и повышение энергетической эффективности производства обусловлена следующими факторами:

1. Высокие затраты на энергетические ресурсы.
2. Постоянный рост тарифов на энергетические ресурсы, затрудненность подключения дополнительных мощностей. Ежегодно тарифы на энергетические ресурсы для предприятий растут, причем с каждым годом данный рост будет все интенсивнее.
3. Увеличение энергопотребления ограничивает рост производства.
4. Предприятиям необходима качественная, надежная и бесперебойная поставка энергетических ресурсов, что не может гарантировать изношенное энергооборудование.



Рисунок 1.1 – Перспективы повышения энергетической эффективности

Энергоемкость отечественного производства обусловлена рядом факторов:

1. Физический и моральный износ технологического оборудования.
2. Физический и моральный износ энергетического оборудования.
3. Несовершенство производственного процесса, в ходе которого нецелесообразно расходуются энергетические ресурсы.

4. Большие теплопотери зданий и сооружений.

5. Низкая культура потребления энергетических ресурсов.

Направлениями повышения энергетической эффективности предприятия, а также оптимизацией потребления энергетических ресурсов являются:

- модернизация технологического оборудования;
- оптимизация производственного процесса;
- мотивация сотрудников к экономии энергоресурсов;
- использование возобновляемых источников энергии;
- снижение теплопотерь зданий и сооружений;
- внедрение энергоэффективных технологий;
- внедрение учета потребления энергетических ресурсов;
- переработка отходов с целью получения энергии [1].

В качестве примера можно привести эффективность перехода к светодиодным источникам света. Ежегодное повышение тарифов на электроэнергию объективно приводят к необходимости ее сбережения. На сегодняшний день наиболее экономичным источником света являются светодиоды. Современные светодиодные технологии позволяют без потери в уровне освещенности помещения заменить традиционные источники света с экономией электроэнергии от 40 до 90 %.

Источником света в предлагаемом светильнике является светодиод, который позволяет без излишних затрат преобразовывать электрический ток в свет. Благодаря этому потребление электроэнергии светодиодами значительно сокращается. И, несмотря на высокую цену светодиодных светильников, их использование не только полностью окупает вложенные затраты в течение от 1,5 года до 2,5 лет (в зависимости от вида светильника), но и позволяет в дальнейшем значительно экономить расходы на электроэнергию и техническое обслуживание.

Преимущества светодиодного освещения:

- Экономия электроэнергии по сравнению с лампами накаливания в 8 раз, а по сравнению с лампами ртутными, люминесцентными экономия порядка в 2 раза;

- Гарантированный ресурс работы самих светодиодов ведущих производителей Osram (Германия), Cree (США). В составе светильника ресурс несколько снижается и составляет около 25–50 тыс. часов. Для сравнения, ресурс лампы накаливания составляет 1000 часов;

- Высокая световая эффективность: лампа накаливания дает 10 Лм на 1 Вт потребляемой мощности, люминесцентная лампа обеспечивает 70 Лм на 1 Вт потребляемой мощности, ртутные лампы 60 Лм на 1 Вт, световая эффективность одного светодиода составляет 100–139 лм на 1 Вт потребляемой мощности. На сегодняшний день компания Cree уже выводит на рынок светодиоды световой эффективностью светодиода 200 Лм на 1 Вт.

- Устойчивость к механическим воздействиям (отсутствие стеклянных деталей, нитей накаливания делает светодиоды устойчивыми к механическим воздействиям, ударам и вибрации).

- Стабильная работоспособность при температуре от –40 до +40 °С.

- Устойчивость к колебанию сетевого напряжения – устойчив диапазон 187–242 В.

- Отсутствие специальных условий утилизации.

При массовом использовании светодиодных светильников снимается опасность перегрузки городских и муниципальных электросетей в момент их включения.

Это легко увидеть из технических характеристик светодиодных светильников, где потребляемый ток равен 0,6–0,9 А, в отличие от традиционных светильников с газоразрядной лампой, где потребляемый ток 2,2 А, а пусковой ток – 4,5 А.

Причиной, по которой предлагаемые энергоэффективные технологии не применяются в массовом масштабе, является более высокая цена по сравнению с ртутными, люминесцентными лампами. Снижение себестоимости светодиодных светильников возможно при увеличении объемов реализации готовой продукции. Также при использовании светодиодных светильников можно сэкономить на закупке кабеля с меньшим сечением, т. к. данные светильники потребляют ток в 3 раза меньше, если провести сравнение с газоразрядной лампой.

В Европе и России приняты постановления, согласно которым государства осуществляют постепенный переход на наиболее эффективные энергосберегающие технологии. Так, уже в 2011 году в России полностью прекратился выпуск ламп мощностью более 100 Вт, что является стимулированием для внедрения предлагаемой технологии и необходимостью ее совершенствования [2].

ООО «ПБН-Восток» использует в качестве осветительных установок светильники с люминесцентными лампами, следовательно, замена источников света на светодиодные значительно повлияет на повышение энергоэффективности данного предприятия.

Список литературы

1. Экспертный портал по вопросам энергосбережения [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: https://gisee.ru/business/actual_articles/. – Дата доступа: 07.03.2020.

2. Пример энергосбережения на предприятии [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: https://gisee.ru/audit/library/?PAGEN_1=9. – Дата доступа: 08.03.2020.

This article deals with the relevance of energy efficiency in the enterprise and factors of its development. It is specially noted the main reasons of inefficiency in the use of electrical energy and energy intensity of production, methods for improving energy efficiency at the enterprise are listing and an example of the effectiveness of one of these methods is given.

Ядешко Анна Тадеушевна, студентка 5 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, annuyadeshko@mail.ru.

Научный руководитель – *Ситкевич Татьяна Анатольевна*, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электроники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, sittan@tut.by.

К. В. ЯНКОВСКИЙ

АВТОМАТИЗАЦИЯ УЧЁТА РЕСУРСОВ

Рассмотрены подходы к автоматизации учета ресурсов и на основе анализа существующих систем предложена структура локальной автоматизированной системы учета ресурсов.

Существуют объективные сложности по снятию показаний с приборов учёта и контроля за потреблением энергоресурсов, особенно при большом количестве потребителей и точек учёта и контроля. Поэтому весьма актуально техническое решение по автоматизации сбора данных.

Под системой учета ресурсов понимается совокупность функционально объединенных устройств, предназначенных для измерения и учета энергии, и других ресурсов удаленного сбора и передачи показаний приборов учета по одной и более точкам поставки.

Существует следующая классификация систем учета ресурсов [1].

1. ССД – системы сбора данных о потреблении ресурсов (устанавливаются на уже существующие у Клиента приборы учета).

2. АСТУР – автоматизированные системы технического учета ресурсов, предназначены для внутреннего аудита и контроля потребления ресурсов непосредственно на местах.

3. АСКУР – автоматизированные системы коммерческого учета ресурсов (устанавливаются приборы учёта в соответствии с требованиями розничного рынка ресурсов и ресурсоснабжающих организаций) – предназначены для проведения коммерческих расчетов со сбытовыми компаниями.

4. АИИС КУР – автоматизированные информационно-измерительные системы коммерческого учета ресурсов для оптового рынка ресурсов.

Классификация автоматизированных информационных измерительных систем (АИИС) приведена на рисунке 1.

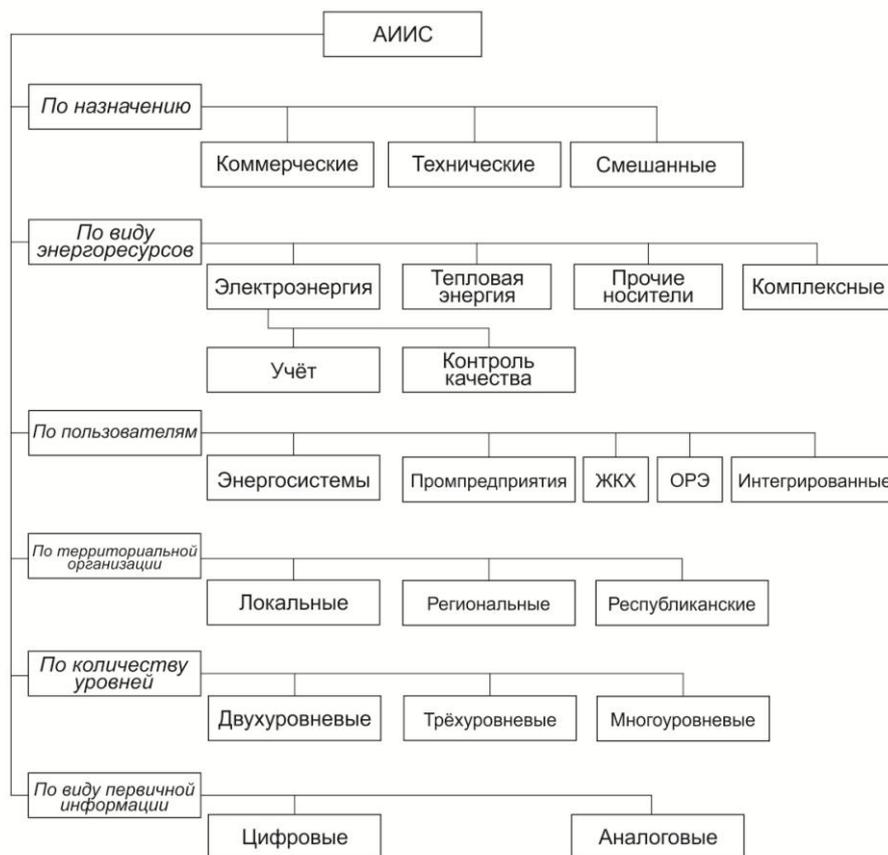
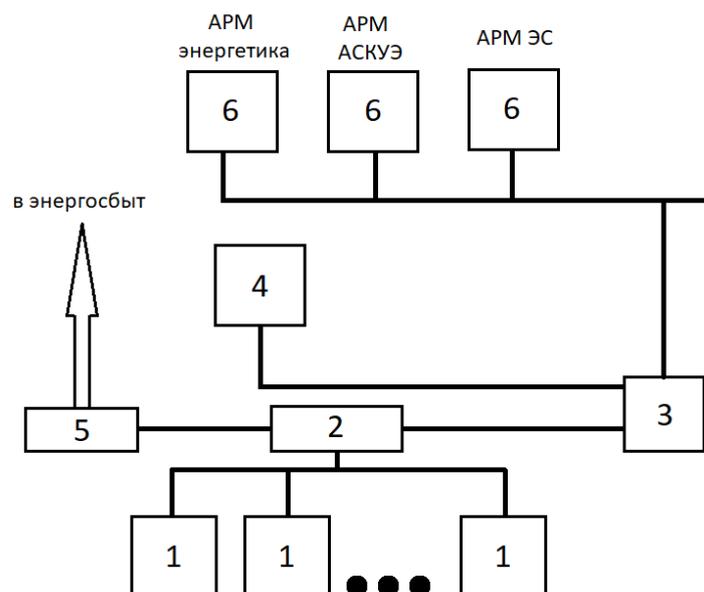


Рисунок 1 – Классификация автоматизированных информационных измерительных систем

В настоящей работе рассмотрены подходы к автоматизации учета ресурсов и на основе анализа существующих систем предложена структура локальной автоматизированной системы учета ресурсов (рисунок 2).



1 – счётчики, 2 – контроллер сбора, обработки и передачи показаний счётчиков, 3 – концентратор, 4 – центральный сервер АСКУР, 5 – модем для связи с энергосбытом, 6 – автоматизированные места

Рисунок 2 – Структура локальной автоматизированной системы учёта ресурсов

Необходимо учитывать, что метрология является важным компонентом ресурсосбережения при создании автоматизированных систем учета [2]. Обязательно требуется оценивать метрологические характеристики таких систем. Одной из важнейших характеристик является, например, относительная погрешность измерительного канала:

$$\delta_{\text{ик}} = \delta_{\text{д}} + \delta_{\text{м}} = \delta_{\text{д}} + \frac{16 \cdot \gamma_{\text{м}}}{A_{\text{м,вх}} - 4} \quad (1)$$

где $\delta_{\text{д}}$ и $\delta_{\text{м}}$ – относительные погрешности датчика и модуля контроллера соответственно, $\gamma_{\text{м}}$ – приведенная погрешность модуля контроллера, $A_{\text{м,вх}}$ – функция преобразования модуля.

Список литературы

1. Куликов, В. М. Методы учета и анализа потребления энергоносителей : учеб. пособие / В. М. Куликов. – Екатеринбург : Изд-во ГОУВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2009. – 138 с.
2. Новиков, В. В. Метрология как важный компонент энергосбережения при создании автоматизированных систем учета для розничных рынков электроэнергии / В. В. Новиков // Журнал законодательной и прикладной метрологии. – 2014. – № 5. – С. 28–30.

Approaches to automation of resource accounting are considered and, based on an analysis of existing systems, the structure of a local automated resource accounting system is proposed.

Янковский Константин Владимирович, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

Научный руководитель – *Василюк Геннадий Тимофеевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

Секция 4

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 372.853

В. И. ГЛЕБОВИЧ

РЕШЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ МЕТОДОМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОЩАДИ ПОД ГРАФИКОМ ФУНКЦИИ

Описаны особенности некоторых задач по физике, для решения которых необходимо знать геометрический смысл физических величин. Это позволяет преодолеть трудности, вызванные отсутствием у учащихся знаний основ дифференциального и интегрального исчисления, поскольку изучение этих тем не предусмотрено учебными программами по математике и физике.

В физике существует особый тип задач, для решения которых используется геометрический смысл физических величин. Ответ на такие задачи дается через нахождение площади фигуры под графиком функции или площади фигуры, ограниченной несколькими кривыми.

Как и для любого типа задач здесь важны математические способности учащихся и умение переносить знания из области математики в физику. Математические навыки, которые должны быть сформированы у учащихся, для решения задач такого типа:

- построение графиков функций $y = kx + b$;
- признаки подобия треугольников и их применение;
- теорема об углах, образованных двумя параллельными прямыми и секущей и ее применение;
- формулы нахождения площади прямоугольника, треугольника, трапеции, окружности;
- основные тригонометрические тождества.

Алгоритм решения задач на нахождение площади фигуры под графиком функции (площади фигуры, ограниченной кривыми) может иметь следующий вид:

- 1) внимательно прочитать и проанализировать условие задачи;
 - 2) записать условие в буквенном виде;
 - 3) выразить все значения величин в единицах СИ;
 - 4) проанализировать данный график или цикл, определить, какие физические процессы, явления происходят в ситуации, описанной в задаче;
- если график в задаче отсутствует:
- а) установить зависимость физических величин друг от друга;
 - б) подобрать оптимальный масштаб для построения графика;
 - в) построить график зависимости процесса (закона, явления), который описывается в задаче;
- 5) используя геометрический смысл искомой физической величины, определить фигуру, образованную графиком функции и координатными осями или фигуру, ограниченную кривыми;
 - 6) записать формулу для нахождения площади полученной фигуры;
 - 7) подставить числовые значения величин с наименованиями единиц их измерения в полученную формулу и вычислить искомую величину;
 - 8) проверить решение, используя для итоговой формулы метод размерностей;
 - 9) проанализировать реальность полученного результата [1].

Рассмотрим применение данного метода на примере двух задач из курса физики 10 класса.

Задача 1. Используя график зависимости силы тока в резисторе, определите, какой заряд прошел через резистор за промежуток времен $\Delta t = 6$ с (рис. 1).

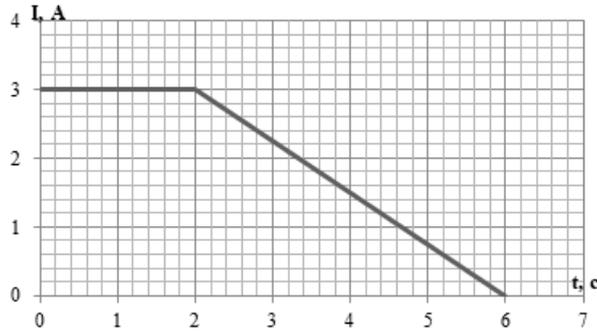


Рисунок 1 – График зависимости силы тока в резисторе от времени

Решение: для определения заряда, прошедшего через резистор, воспользуемся геометрическим смыслом этой величины. Величина заряда будет определяться как площадь фигуры под графиком функции $I(t)$. Она будет состоять из площади прямоугольника:

$$q_1 = 2 \text{ c} \cdot 3 \text{ A} = 6 \text{ Кл} ,$$

и площади прямоугольного треугольника:

$$q_2 = \frac{1}{2}(6-2)\text{c} \cdot 3 \text{ A} = 6 \text{ Кл} .$$

Искомая величина: $q = q_1 + q_2 = 12 \text{ Кл} .$

Ответ: $q = 12 \text{ Кл} .$

Задача 2. Определить работу A , которую совершит идеальный газ за цикл 1–4–3–2–1 (рис. 2), если $p_1 = 10^5 \text{ Па} , p_0 = 3 \cdot 10^5 \text{ Па} , p_2 = 4 \cdot 10^5 \text{ Па} , V_1 = 10 \text{ л} , V_2 = 20 \text{ л} [2]$.

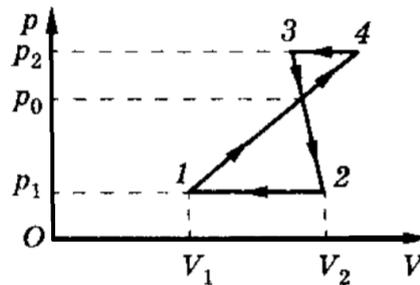


Рисунок 2 – Цикл идеального газа

Решение: работа, совершаемая системой при циклическом процессе численно равна площади фигуры, ограниченной линиями, которые изображают цикл в координатах $p(V)$. Для нахождения работы газа данного циклического процесса необходимо рассчитать разность площадей нижнего и верхнего треугольников. Нахождение работы нижнего треугольника не составляет труда по имеющимся в условии данным:

$$A_1 = \frac{1}{2}(V_2 - V_1)(p_0 - p_1) = 1 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 1 \text{ кДж} .$$

Чтобы найти площадь второго треугольника, необходимо доказать подобие этих треугольников. Доказательство.

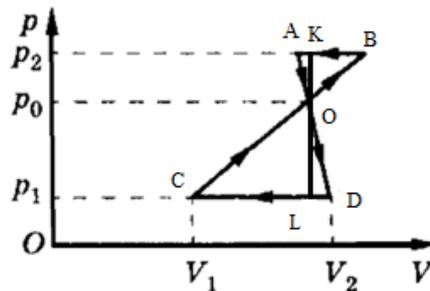


Рисунок 3 – Доказательство подобия треугольников

Рассмотрим $\triangle AKO$ и $\triangle DLO$ – прямоугольные ($\angle K = \angle L = 90^\circ$) (рис. 2). $\angle KAO = \angle LDO$ – по свойству накрест лежащих углов при $AB \parallel CD$ и секущей AD . Тогда $\triangle AKO$ подобен $\triangle DLO$ по острому углу.

$\frac{KO}{LO} = \frac{AO}{DO} = \frac{1}{2}$. Аналогично подобными являются $\triangle BKO$ и $\triangle CLO$, $\frac{KO}{LO} = \frac{BO}{CO} = \frac{1}{2}$. Следовательно

$$\frac{BO}{CO} = \frac{AO}{DO} = \frac{1}{2}.$$

Рассмотрим $\triangle AOB$ и $\triangle DOC$, $\angle AOB = \angle DOC$ как вертикальные углы. $\frac{BO}{CO} = \frac{AO}{DO}$. Значит $\triangle AOB$ подобен $\triangle DOC$.

Отношение площадей двух подобных треугольников равно квадрату коэффициента подобия.

Следовательно:

$$\frac{S_{\triangle AOB}}{S_{\triangle DOC}} = \left(\frac{1}{2}\right)^2, \quad A_1 \text{ численно равно } S_{\triangle DOC}, \quad A_2 \text{ численно равно } S_{\triangle AOB}, \text{ откуда}$$

$$\frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{1}{2}\right)^2$$

$$A_2 = \frac{A_1}{4} = \frac{1 \text{ кДж}}{4} = 0,25 \text{ кДж}.$$

$$A = A_1 - A_2 = 0,75 \text{ кДж}$$

Ответ: $A = 0,75 \text{ кДж}$.

Таким образом, графический смысл физических величин и решение задач с его применением способствует более глубокому пониманию физических явлений и процессов. Кроме того, данный способ решения задач такого типа позволяет существенно облегчить решение, особенно на повышенном уровне изучения физики. Работа с графиком – главная часть решения задачи и важную роль здесь играет сформированность математических навыков учащихся.

Список литературы

1. Володарский, В. Е. Обучение школьников решению задач / В. Е. Володарский // Физика в школе. – 2002. – № 7. – С. 42–44.
2. Физика: 3800 задач для школьников и поступающих в вузы / Н. В. Турчина [и др.]. – М. : Дрофа, 2000. – 672 с.

The article describes the features of some problems in physics, for the solution of which it is necessary to know the geometric meaning of physical quantities. This allows us to overcome the difficulties caused by the lack of knowledge among students of the fundamentals of differential and integral calculus, since the study of these topics is not provided for by curricula in mathematics and physics.

Глебович Валентина Ивановна, аспирант кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, glebovicz_vi@mail.ru.

Научный руководитель – Харазян Оксана Гагиковна, кандидат педагогических наук, доцент, заместитель декана факультета довузовской подготовки Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, kharazian.og@gmail.com.

УДК 37.016:53

С. И. ГРАЕВСКАЯ

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ СИСТЕМАТИЗАЦИИ И ОБОБЩЕНИЯ ЗНАНИЙ УЧАЩИХСЯ ПО ФИЗИКЕ

Раскрыта сущность понятий *систематизация* и *обобщение знаний* на уроках физики. Разработаны способы систематизации и обобщения знаний по физике при работе с формулами и теорией. Разработаны задания для систематизации и обобщения знаний учащихся 8 класса по разделу «Тепловые явления» и учащихся 10 класса по разделу «Электростатика».

Систематизация и обобщение знаний учащихся является составной частью процесса обучения. Под систематизацией следует понимать мыслительную деятельность, в процессе которой изучаемые объекты организуются в определенную систему на основе выбранного принципа. Важнейший вид систематизации – классификация, т. е. распределение объектов по группам на основе установления сходства и различия между

ними. Обобщение знаний представляет собой переход на более высокую ступень абстракции путем выделения общих признаков (свойств, отношений, тенденций развития и т. п.) предметов рассматриваемой области; влечет за собой появление новых научных понятий, законов, теорий, приводит к существенному изменению их качества, к усвоению ядра знаний, их системы [3].

Некоторые учителя традиционно подходят к организации систематизации и обобщения знаний учащихся, используют его в основном ради показателей достигнутого. В тот время, как грамотно организованная систематизация и обобщение учебной деятельности учащихся позволяет учителю оценивать получаемые ими знания, умения, навыки, вовремя оказать необходимую помощь и добиваться поставленных целей обучения [1].

В учебном процессе по физике систематизацию и обобщение знаний учащихся можно организовать двумя способами: на этапе урока изучения нового учебного материала (или урока повторения знаний) и на уроке систематизации и обобщения знаний. На этих уроках систематизируются знания, устанавливаются взаимосвязи понятий, сравниваются изучаемые факты и явления на межпредметной основе [2].

В процессе обучения физике целесообразно проводить систематизацию и обобщение следующих элементов знаний: физических формул; физической теории.

При работе с формулами можно реализовать следующие подходы:

1. Суть первого подхода заключается в том, что учащимся предлагаются различные физические величины, из которых они должны составить максимальное количество физических формул.
2. В данном подходе учащимся предлагаются формулы, которые необходимо изучить и определить, какие из них верные, а какие неверные.
3. Данный подход заключается в следующем, учащимся предлагается таблица, в которой предложены различные физические величины, задача учащихся состоит в том, что они должны выразить каждую из физических величин через другие физические величины.

При работе с физической теорией можно реализовать следующие подходы:

1. Систематизировать знания о физических величинах (обозначение величин, единицы измерения, названия) можно через заполнение таблиц. Данный подход можно реализовать в двух вариантах. Первый вариант заключается в том, что учащимся предлагается таблица, которую они должны самостоятельно заполнить. Вторым вариантом является в следующем: учащимся предлагается таблица, в которой уже заполнены некоторые строки, задача учащихся состоит в том, что они должны дополнить недостающие элементы таблицы.
2. Суть данного подхода заключается в следующем: учащимся предлагаются названия физических величин, различные единицы измерения и обозначения физических величин. Задача учащихся состоит в том, чтобы установить соответствие между названиями, обозначениями и единицами измерений.
3. Данный подход заключается в том, что учащимся предлагается составить и заполнить схему по изученной теории. В данном подходе учитель может предложить для заполнения уже готовую схему, в которой будет отражена физическая теория.
4. Суть данного подхода заключается в том, что учащимся предлагается заполнить таблицу, в которой будет отражена физическая теория в структурной форме.
5. В данном подходе учащимся предлагается таблица, в которой нужно установить соответствие между понятиями и их определениями.
6. Данный подход заключается в том, что учащимся необходимо этапы физического процесса расставить в правильном порядке.

Рассмотрим примеры заданий на систематизацию и обобщение знаний учащихся:

Пример 1. Учащимся предлагается таблица, в которой уже заполнены некоторые строки, задача учащихся состоит в том, что они должны дополнить недостающие элементы таблицы.

Таблица 1 – Задание по теме: «Расчет количества теплоты при нагревании и охлаждении. Удельная теплоемкость»

Обозначение физической величины	Название физической величины	Единицы измерения
V		
	Масса	
Δt		
	Удельная теплоемкость	
		Дж/К
	Удельная теплота сгорания	
		Дж/кг
L		
		Дж
ρ		

Пример 2. Ученикам необходимо этапы физического процесса расставить в нужном порядке.

Индукционные заряды проводника создают добавочное электрическое поле, направление которого противоположно внешнему полю
Свободные электроны начинают перемещаться внутри проводника в сторону, противоположную направлению линий напряженности
На одной стороне проводника возникает избыточный отрицательный заряд, а на другой стороне проводника – избыточный положительный заряд
Движение электронов прекращается, когда напряженность электростатического поля, создаваемого индуцированными зарядами, становится равной по модулю напряженности внешнего поля

Рисунок 1 – Задание по теме: «Проводники в электрическом поле»

Пример 3. Учащимся предлагается таблица, в которой представлены различные физические величины, задача учащихся состоит в том, что они должны выразить каждую из физических величин через другие физические величины.

Таблица 2 – Задание по теме: «Движение по окружности»

	v	ω	ν	T
v				
ω				
ν				
T				

Таким образом, роль систематизации и обобщения знаний велика, так как улучшается не только качество усваиваемого материала, но и развивается способность анализировать, абстрактно представлять многие понятия и определения. Систематизация и обобщение знаний являются важным и необходимым условием глубокого и осознанного усвоения информации и формирования таких приемов мышления, как анализ, синтез, абстрагирование, сравнение, аналогия, обобщение, конкретизация.

Список литературы

1. Бугаев, А. И. Методика преподавания физики в средней школе: теорет. основы : учеб. пособие для студ. пед. ин-тов. по физ.- матем. спец. / А. И. Бугаев. – М. : Просвещение, 1981. – 288 с.
2. Кульбицкий, Д. И. Методика обучения физике в средней школе : учеб. пособие / Д. И. Кульбицкий. – Минск : ИВЦ Минфина, 2007. – 220 с.
3. Матецкий, Н. В. Решение задач как способ систематизации и обобщения знаний учащихся / Н. В. Матецкий, О. Г. Харазян // Фізика: праблемы выкладання. – 2007. – № 2. – С. 23–29.

The essence of systematization and generalization of knowledge in physics lessons is revealed. Methods of systematization and generalization of knowledge in physics when working with formulas, theory, and algorithms for solving problems have been developed. Complex tasks were developed for systematization and generalization of knowledge of students of the 10th grade in the section «Electrical phenomena» and students of the 8th grade in the section «Thermal phenomena».

Граевская Светлана Игоревна, студентка 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, graevsk99@gmail.com.

Научный руководитель – *Харазян Оксана Гагиковна*, кандидат педагогических наук, доцент, заместитель декана факультета довузовской подготовки Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, kharazian.og@gmail.com.

А. Т. КИШУБАЕВА, А. БАЗАРБЕК

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ОБРАЗОВАНИЯ ИНЖЕНЕРОВ В ВУЗЕ

Рассмотрена организация практико-ориентированного образования. Основной целью обучения студентов технических специальностей является выпуск высококвалифицированных специалистов. В век новых технологий и современной техники образование не стоит на одном месте, поэтому мы достигнем поставленных целей, используя новые практические работы и устройства для организации качественной производственной практики.

Основной причиной плохой подготовленности многих инженеров является нехватка практических занятий и производственной практики. Это обусловлено тем фактом, что большинство учебных систем в вузах подразумевает самостоятельное обучение студентов. Большинство студентов получают хорошие теоретические знания, но использование теоретических знаний на практике не всегда возможно, потому что теоретические и практические знания имеют некие отличия.

Организация практико-ориентированного образования дает эффективное усвоение теоретической информации и заодно получение новых знаний, которые в теории были не до конца усвоены. Таким образом, современное высшее образование, выполняя социальный заказ общества на подготовку высококвалифицированных специалистов, способных адаптироваться к социально-экономическим преобразованиям, определяет направления поиска путей существенного изменения технологий обучения, направленных на повышение качества его конечных результатов. С позиции логического подхода идет переосмысление целей и задач ориентации будущих инженеров на формирование ключевых компетенций – целостной системы универсальных и профессиональных знаний, умений, навыков решения значимых и практически важных для личности и общества задач [1].

Новые подходы к обучению студентов технических специальностей в вузах определили основу изучения и анализа технологий, которые приведут к новым плодам в образовательных программах и в производственной практике. Следует подчеркнуть, что по Болонской системе обучения значительная часть учебного времени выделена на самостоятельную учебную деятельность студента. В связи с этим актуальной становится необходимость целенаправленного самостоятельного обучения, а это все подводит к тому что, начиная с учебной практики, вплоть до преддипломной практики молодые инженеры должны понимать направление обучения и основы практических заданий для успешного прохождения практики.

В данном контексте основной проблемой всех вузов Республики Казахстан, которые обучают инженеров, является нехватка мест для прохождения производственной практики, так как большинство важных производств или отраслей промышленности не подразумевает прохождения стажировки или обучения студентов, в основном во все места, связанные с техническими специальностями в вузах, часто требуются кадры, которые имеют опыт работы или стаж работы в той или иной технической сфере обучения. И если решить такие мелкие недочеты, то в наших университетах готовят высококвалифицированных молодых специалистов для работы в производстве.

Анализируя нынешние тенденции и темпы развития мирового образовательного пространства, определили специфику знаний на современном этапе и сформировали запрос большинства работодателей на их получение. Удовлетворение требований науки и производства вызывает необходимость разностороннего развития компетенций специалиста, выражающихся в единстве теоретической и практической готовности к осуществлению профессиональной деятельности и знанию иностранных языков. В большинстве случаев в вузах стараются подготовить тех специалистов, которые соответствуют запросам работодателей, но на самом деле максимально подготовленным быть почти невозможно, так как всегда и везде новые технологий и новые знания [2].

Есть несколько правильных подходов для решения этих задач:

1. Уменьшить время самостоятельных занятий студента, увеличить количество часов для практических работ или обучения.
2. Вести мониторинг начиная с учебной практики до преддипломной практики, следуя тем фактам, что в большинстве случаев полного прохождения практики не бывает, включая тот факт, что рядовой студент сам должен быть заинтересованным в этом.
3. Составление и контроль образовательных программ с участием работодателей, нуждающихся в определенных кадрах, которых требуют запросы рынка труда.
4. Успешное практико-ориентированное образование невозможно, если не заинтересовать обучающегося, а это все напрямую зависит от преподавателя и актуальности образовательной программы на тот или иной момент.

5. Реализация вышеупомянутых пунктов и контроль качества обучения путем аккредитации.

Если начнем с первого пункта, то самостоятельные занятия – очень умное решение и хороший способ обучения, но есть несколько нюансов: это не может полностью доказать, что студент учил или имеет такие теоретические знания. Идеальное решение найти невозможно, пока все находится в теории, аргументируя тот факт, что систему обучения не изменить, надо делать некие дополнения и менять курс развития в сфере подготовке специалистов. В итоге первая ситуация может решиться при получении неких прав или площадок для реализации [3].

Второй пункт подразумевает, что, начиная с начальных курсов обучения, ведется мониторинг ежегодной практики. Итоговый отчет может предоставить полные данные о практических навыках, которые студент приобрел, проходя ту или иную практику для эффективного усвоения всех теоретических знаний. Факт, что в большинстве случаев студенты во время прохождения практики не допускаются к производству, аргументируется тем, что руководитель практики не имеет права допускать на промышленность обычного студента без квалификации. Длится практика по-разному. В некоторых вузах студентам достаточно проработать пару недель, а в некоторых – пару месяцев. Все зависит от учебного заведения. Производственная практика не заканчивается только работой в учреждении. После того, как она закончилась, учащемуся нужно подготовить отчет. Это работа, которая по важности стоит рядом с курсовой. А преддипломную практику можно сравнить с дипломной работой. И главное – с помощью мониторинга мы добиваемся максимального контроля и эффективности общей практики. Общие черты практики технических специальностей очень схожи и имеют свои специфику [4].

Практические занятия служат своеобразной формой осуществления связи теории с практикой. Структура практических занятий в основном одинакова – вступление преподавателя, вопросы студентов по материалу, который требует дополнительных разъяснений, собственно практическая часть, заключительное слово преподавателя. Разнообразие возникает в собственно практической части, включающей рефераты, доклады, дискуссии, тренировочные упражнения, решение задач, наблюдения, эксперименты и т. д. Опыт показывает, что нельзя на практических занятиях ограничиваться выработкой только практических навыков, техникой решения задач, построения графиков и т. п. Студенты должны всегда видеть ведущую идею курса и связь ее с практикой. Цель занятий должна быть понятна не только преподавателю, но и студентам. Это придает учебной работе жизненный характер, утверждает необходимость овладения опытом профессиональной деятельности, связывает их с практикой жизни. И эта основа третьего пункта показывает, что практические занятия нужны для дополнения теоретических занятий [5].

В настоящее время в обучении «педагог – студент» можно классифицировать три основных метода: пассивные, активные и интерактивные – каждый метод имеет свои преимущества и условия для применения. Самый известный пассивный метод – традиционный способ устного донесения преподавателем необходимых для усвоения теоретических знаний. С помощью этого вида обучения преподаватель в легкой форме может донести всю информацию из лекции для студентов в формате повествования, используя такие методы, как конспекты, самостоятельные, контрольные работы, а тесты служат, как правило, для мониторинга качества знания обучающихся. Этот метод малоэффективен для очень большого количества информации. Активные и интерактивные методы обучения имеют разницу в том, что плавное и подробное изложение материала преподавателем включает активное участие студентов во время их обучения: используется информация, найденная самими студентами при полном усвоения материала с подачи преподавателя. Аргументируя все вышесказанное, можно понять, что, ограничивая себя одним методом обучения, достичь эффективного и полного усвоения материала маловероятно или возможно в редких случаях.

Все вышеуказанные пункты имеют свои преимущества и недостатки, поэтому нужно конкретизировать случаи для их применения, при этом необходимо ведение контроля над всем процессом обучения после аккредитации образовательных программ и всего университета. Аккредитация – это контроль качества обучения независимыми экспертами, имеющими опыт в работе обучения в вузах, она также помогает при внешней проверке Министерства образования и науки Республики Казахстан.

Список литературы

1. Берденникова, Н. Г. Организационное и методическое обеспечение учебного процесса в вузе : учеб. пособие / Н. Г. Берденникова, В. И. Меденцев, Н. И. Панов. – СПб. : Д.А.Р.К., 2006. – 208 с. – (Серия: Новое в высшем профессиональном образовании).
2. Беспалько, В. П. Педагогика и прогрессивные технологии обучения / В. П. Беспалько. – М. : Изд-во ИРПО МО РФ, 1995. – 336 с.
3. Наумкин, Н. И. Модульная структура общетехнических дисциплин, направленная на подготовку студентов к инновационной деятельности / Н. И. Наумкин, Г. А. Кондратьева // Психология и педагогика: актуальные вопросы : сб. публикаций науч. журн. по материалам III междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург. – СПб, 2014.

4. Наумкин, Н. И. Методическая система формирования у студентов технических вузов способностей к инновационной инженерной деятельности : моногр. / Н. И. Наумкин ; под ред. П. В. Сенина, Л. В. Масленниковой, Д. Я. Тамарчак ; Моск. гос. пед. ун-т. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2008. – 172 с.

5. Наумкин, Н. И. Подготовка студентов национальных исследовательских университетов к инновационной деятельности в процессе обучения техническому творчеству / Н. И. Наумкин, Е. П. Грошева, В. Ф. Купряшкин ; под ред. П. В. Сенина, Ю. Л. Хотунцева ; Моск. гос. пед. ун-т. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2008. – 172 с.

6. Бадмаева, Б. Ц. Методика преподавания психологии : учеб.-метод. пособие / Б. Ц. Бадмаева. – М. : Гуманитарный изд. центр «ВЛАДОС», 1999. – 304 с.

Базарбек Амре, Евразийский Национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан, amrebazarbek@gmail.com.

Кишубаева Алтынай Тулпаровна, магистр, старший преподаватель Евразийского Национального университета имени Л. Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан, Kishubaeva_at@enu.kz.

УДК 37.016:53

М. М. КОЛОСОВСКАЯ

РЕШЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ЗАДАЧ ПО ФИЗИКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРАКТИВНОЙ ДОСКИ

Раскрыто понятие качественной задачи. Разработано 6 подходов к решению качественных задач на интерактивной доске. Приведено 3 примера качественных задач по физике, решаемых с помощью данных подходов.

На уроках по физике очень важно решать качественные задачи. Качественные задачи способствуют более глубокому пониманию физических теорий, формированию правильных физических представлений, повышают интерес учащихся к физике и поддерживают активное восприятие ими материала в течение урока, позволяют проверить действительно ли учащиеся поняли сущность физических явлений, закрепить полученную информацию.

Качественной задачей по физике называется такая задача, которая связана с качественной стороной физического явления, решаемая путем логических умозаключений, основанных на законах физики, путем построения чертежа, выполнения эксперимента, но без применения математических действий.

Следует отличать качественную задачу от вопроса по проверке формальных знаний. Цель последних – закрепить формальные знания учащихся; ответы на эти вопросы в готовом виде имеются в учебнике, и ученик должен лишь вспомнить их. В качественной задаче ставится такой вопрос, ответ на который в готовом виде в учебнике не содержится. (Например: если движущийся автомобиль резко затормозит, то его передок опускается. Почему?) Ученик должен составить ответ на качественную задачу, синтезируя данные условия задачи и свои знания по физике [2].

Решение качественных задач способствует осуществлению дидактического принципа единства теории и практики в процессе обучения физике. В частности, применение экспериментальных задач развивает умение и навыки учащихся в обращении с физическими приборами, макетами, установками и моделями. Качественные задачи с производственным содержанием знакомят учащихся с техникой, расширяют их кругозор, являются одним из средств подготовки учащихся к практической деятельности. Таким образом, решение качественных задач по физике является одним из важных приемов политехнического обучения.

Методическая ценность качественных задач проявляется особенно при изучении таких разделов курса физики, в которых нет физических формул и явления рассматриваются лишь с качественной стороны (например, закон инерции, электромагнетизм). Использование качественных задач способствует более глубокому пониманию физических теорий, формированию правильных физических представлений, следовательно, предупреждает формализм в знаниях учащихся [1].

Чтобы решить качественную задачу, ученик должен уметь физически мыслить: понимать и излагать сущность состояний тел и процессов, происходящих в них, вскрывать взаимосвязь явлений (причинноследственные зависимости), уметь на основании законов физики предвидеть ход явления. Итак, решение качественных задач дает возможность учителю установить глубину теоретических знаний и понимание учащимся изучаемого материала.

Подходы к решению качественных задач на интерактивной доске.

1. Решение качественных задач через игровую деятельность

У детей необходимо использовать и направлять в целях решения определенных учебных задач, потребность и желание играть. Игнорирование этих потребностей в учебно-воспитательной работе означало бы игнорирование особенностей развития ребенка. Таким образом, включение в урок физики игровой деятельности носит обучающий характер, сближает новую учебную деятельность с привычной для ребёнка игровой деятельностью и делает менее заметным переход к серьёзной учебной работе.

2. Решение качественных задач с помощью выполнения рисунка на интерактивной доске

Условия данного типа задач представлены на доске, учащимся необходимо выйти к доске и дополнить рисунки, например, с помощью инструмента «Линия».

3. Решение качественных задач, в которых учащимся необходимо установить соответствие

В данных задачах учащимся необходимо установить соответствия. Для этого они должны переместить один из объектов. К указанным объектам заранее применяется свойство «Утилита множественного клонирования»

4. Устное решение качественных задач с объяснением на доске

В данных задачах условие формулирует учитель и представляет его на слайде. Учащиеся решают задачи, и учитель проверяет правильность их решения. В некоторых задачах решение задачи может быть скрыто с помощью инструмента «Затенение экрана», тогда учащиеся сами могут проверить правильность своего решения.

5. Решение качественных задач, в которых необходимо выбрать правильный вариант ответа

В данных задачах учащимся необходимо выбрать правильный вариант ответа из вариантов, предложенных учителем.

6. Решение качественных задач, в которых необходимо выполнить перемещение объекта

В данных задачах, для того, чтобы отобразить решение задачи, учащимся необходимо перетащить объекты, расположенные на экране в нужные места.

Примеры качественных задач по физике, решаемых с помощью данных подходов.

1. Качественная задача, решаемая через игровую деятельность

На экране изображены 6 квадратов различных цветов. В каждом из квадратов находится вопрос, который открывается только после нажатия на квадрат. Учащимся предлагается, нажав на барабан в центре ответить на вопрос, находящийся в квадрате того цвета, на который укажет стрелка барабана (рисунок 1).

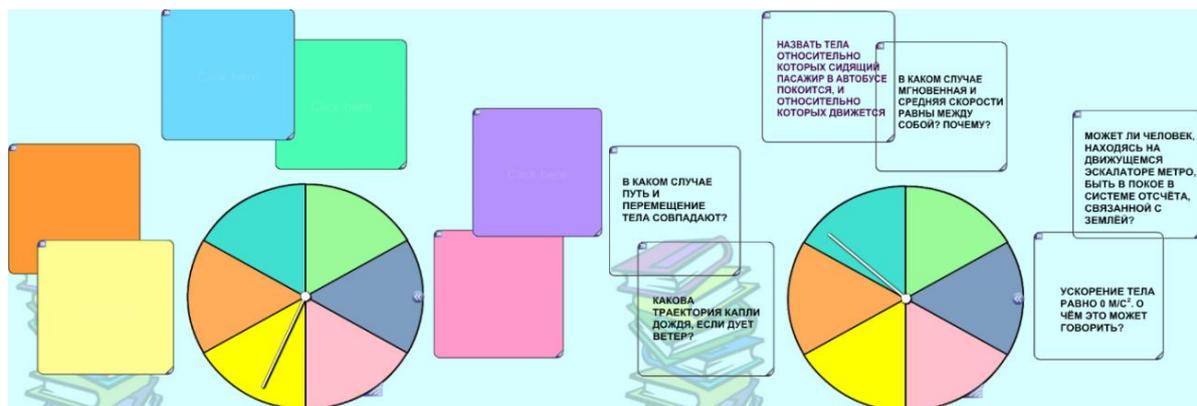


Рисунок 1 – Задача по теме «Движение»

2. Качественная задача, при решение которой учащимся необходимо установить соответствие

В данной задаче изображены силовые линии электростатических полей. Учащимся необходимо установить соответствие между силовыми линиями и электрическими зарядами (рисунок 2).

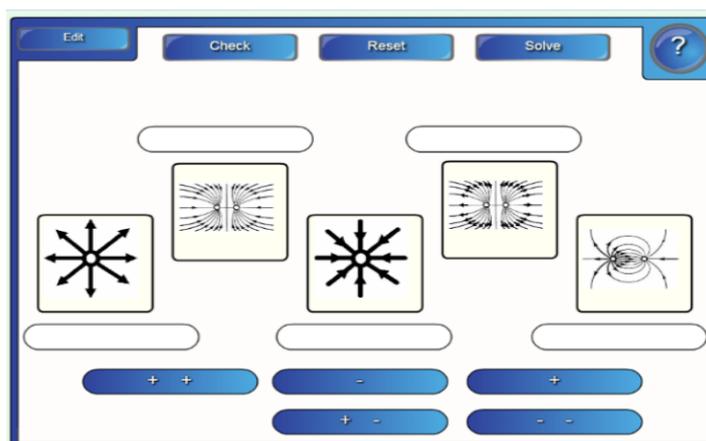


Рисунок 2 – Задача по теме «Электростатика»

3. Качественных задача, при решении которой необходимо выполнить перемещение объекта

Для того, чтобы отобразить решение задачи, учащимся необходимо перетащить объекты, расположенные на экране, в нужные места (рисунок 3).

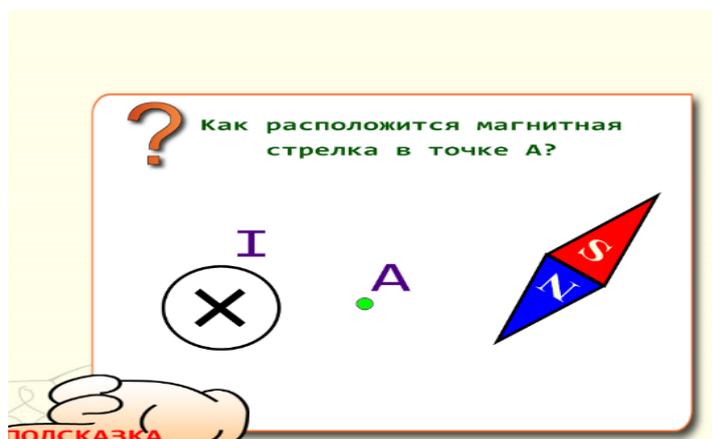


Рисунок 3 – Задача по теме «Магнитное поле»

Использование качественных задач способствует более глубокому пониманию физических теорий, формированию правильных физических представлений, следовательно, предупреждает формализм в знаниях учащихся. Также качественные задачи по физике способствуют углублению и закреплению знаний учащихся. Они служат средством проверки знаний и практических навыков школьников. Умелое применение учителем качественных задач повышает интерес учащихся к физике и поддерживает активное восприятие ими материала в течение урока.

Список литературы

1. Бугаев, А. И. Методика преподавания физики в средней школе: теорет. основы : учеб. пособие для студ. пед. ин-тов по физ.- матем. спец. / А. И. Бугаев. – М. : Просвещение, 1981. – 288 с.
2. Теория и методика обучения физике в школе. Общие вопросы : учеб. пособие для студ. высш. пед. учеб. заведений / С. Е. Каменецкий [и др.] ; под ред. С. Е. Каменецкого, Н. С. Пурышевой. – М. : Изд. центр «Академия», 2000. – 368 с.

The concept of a quality problem is discovered 6 approaches to solving high-quality tasks on an interactive board have been developed, which are solved using these approaches.

Колосовская Марина Михайловна, студентка физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, marinakolosovska199@gmail.com.

Научный руководитель – *Харазян Оксана Гагиковна*, кандидат педагогических наук, доцент, заместитель декана факультета довузовской подготовки Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, kharazian.og@gmail.com.

УДК 37.016:53

О. Г. КОНДРАТЬЕВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОБИЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ В ИЗУЧЕНИИ ФИЗИКИ В СРЕДНЕЙ ШКОЛЕ

Показаны некоторые методические аспекты применения мобильного телефона в учебном процессе, в частности, при изучении физики в средней школе.

Рассмотрим, какие приложения могут помочь в использовании мобильного телефона на уроках по физике. Первый сервис, который поможет нам это Google forms. Рассмотрим поближе, что такое Google forms и их возможности. Google forms – это онлайн-сервис позволяющий создавать опросы, онлайн-тестирование и наладить обратную связь с учащимися [1]. С помощью Google forms можно сделать:

- 1) онлайн-исследование,
- 2) голосование,
- 3) получить обратную связь с учащимися,
- 4) проводить тестирование и викторины,
- 5) анкету для отзывов,
- 6) бриф.

Так при использовании мобильного телефона для изучения физики нам помет такой сервис как Padlet. Padlet – это веб-сайт, на котором можно общаться с другими пользователями, используя текстовые сообщения, ссылки, фотографии и многое другое. Каждое такое место для общения называется «стена». Также Padlet можно использовать в качестве онлайн доски [2]. Онлайн-доска – это сервис, с помощью которого каждый ученик класса может вывести свою работу на доску, а учитель в свою очередь может оценить и дать комментарий по каждому ученику, не потратив на это много времени и не собирая тетрадей.

Padlet можно использовать для:

1. Повторения ранее изученного материала.
2. Совместного конспектирования.
3. Планирования мероприятий.
4. Проведения собраний.
5. Опроса после изучения нового материала.
6. Хранения материалов и документов.

7. Так же можно использовать для совместного сбора материала по той или иной теме. Учащиеся могут поделиться на группы, и все группы представят результаты работы на одной доске.

8. Размещения дополнительных материалов к той или иной теме, загрузить на доску видео, ссылки на материалы, картинки и поделиться ссылкой с классом. Учащиеся, которым интересно познакомиться с темой глубже, могут найти информацию на такой доске.

9. Получения обратной связи с учащимися.

Для быстрого донесения информации хранящейся на данных сервисах можно использовать QR-коды.

QR-код или Quick Response («быстрый отклик») – это база данных, только вместо всем нам знакомых полосок используются квадраты [3].

Основное достоинство QR-кода – это легкое распознавание сканирующим оборудованием, что дает возможность использовать их в различных сферах деятельности человека.

Один QR-код может содержать:

- 1) 7098 цифр,
- 2) 4296 букв и цифр латиницей,
- 3) 1817 иероглифов,
- 4) 2953 байт двоичного кода [3].

Применим данные приложения для конкретного урока по физике.

Урок по теме «АРХИМЕДОВА СИЛА. ПЛАВАНИЕ ТЕЛ» [4].

Класс: 7.

Тип урока: изучение нового материала.

Задачи урока:

Обучающая: сформировать знания учащихся об архимедовой силе, умение выводить формулу, выражающую зависимость выталкивающей силы от плотности жидкости (газа) и объема тела.

Развивающая: продолжить формирование умений устанавливать причинно-следственные связи между фактами, явлениями и причинами.

Воспитывающая: продолжить формирование познавательного интереса к предмету «Физика»; познакомить учащихся с практическими применениями закона в технике и для повышения интереса к изучаемому материалу осветить роль Архимеда в физике.

Методы обучения: объяснительно-иллюстративный, частично-поисковый.

Данный урок мы проведем с помощью Google forms.

Ход урока:

Урок мы начнем с актуализации знаний и умений учащихся по данной теме. Для этого учащимся будет предложено решить тест [5].

Тест на актуализацию знаний:

1. Какая сила создаёт давление внутри жидкости и газа?
 - а) сила трения
 - б) сила взаимодействия между молекулами
 - в) сила упругости
 - г) сила тяжести
2. От какой величины зависит давление в жидкости?
 - а) сила трения жидкости о стенки сосуда
 - б) объему жидкости
 - в) плотность жидкости
3. Давление воздуха или водяного пара больше при одинаковых условиях?
 - а) их давления одинаковы
 - б) водяного пара
 - в) воздуха
 - г) для ответа нужны дополнительные сведения
4. В сосуды налиты до одной и той же высоты разные жидкости: ацетон, бензин, керосин. В каком из сосудов давление на дно наименьшее?
 - а) ацетон
 - б) бензин
 - в) керосин
 - г) во всех одинаково
5. Каково давление воды на глубине 2 м?
 - а) 20кПа
 - б) 10кПа
 - в) 200кПа
 - г) 100кПа

Данный тест каждый учащийся сможет открыть у себя в телефоне, используя данный QR-код.



Рисунок 1 – QR-код тест на актуализацию знаний

Далее учитель объясняет ученикам новый материал, работает с учащимися и задаёт вопросы. Учитель рассказывает, что существует сила, которая действует на тело, находящееся в воду. Затем вводит понятие архимедовой силы. Учащиеся записывают определение.

После этого учитель задает вопрос, а от чего зависит архимедова сила?

После рассуждения класса учитель дает ответ на этот вопрос и записывает на доске формулу исследуемой силы.

Далее учитель рассказывает учащимся про условия плавания тел [4].

После объяснения нового материала учитель предлагает ответить на следующие *вопросы:*

1. К коромыслу весов подвешены два цилиндра одинаковой массы: свинцовый и алюминиевый. Весы находятся в равновесии. Нарушится ли равновесие весов, если оба цилиндра одновременно погрузить в воду? Спирт? Ответ обоснуйте.

2. К коромыслу весов подвешены два одинаковых по объему алюминиевых цилиндра. Нарушится ли равновесие весов, если один цилиндр поместить в воду, а другой – в спирт? Ответ обоснуйте.
 3. Какая сила возникает при погружении тела в жидкость?
 4. Какая сила возникает при погружении тела в жидкость?
- Данные вопросы также создадим в Google формах и дадим учащимся еще один QR-код.



Рисунок 2 – QR-код вопросы на закрепление

После этого учитель выслушивает ответы учеников и анализирует их вместе с классом.

Далее учитель подводит итоги урока, выставляет оценки за урок и выдает домашнее задание.

Таким образом, можно сделать вывод, что использовать мобильный телефон при изучении физики в средней школе можно и это будет полезно и облегчит работу учителя и будет интересно учащимся.

Список литературы

1. Соловьева, Е. Как использовать Google Forms по максимуму [Электронный ресурс] / Е. Соловьева. – 2019. – Режим доступа: <https://netology.ru/blog/google-formy>. – Дата доступа: 18.11.2019.
2. Родионова, Е. Онлайн доска Padlet для учителя [Электронный ресурс] / Е. Родионова. – 2019. – Режим доступа: <https://evrophiz.wordpress.com/2017/09/25>. – Дата доступа: 26.12.2019.
3. Креативная студия «Про-движение». Что такое QR-код: что с ним можно делать [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://zen.yandex.ru/media/propromotion/chto-takoe-qrkod-chto-s-nim-mojno-delat-5d778beb5ba2b500ad95115a>. – Дата доступа: 01.12.2019.
4. Исаченкова, Л. А. Физика : учеб. пособие для 7 кл. учр. среднего образования с рус. яз. обучения / Л. А. Исаченкова, Ю. Д. Лещинский. – Минск : Аверсэв, 2017. – 168 с.
5. Лукашик, В. И. Сборник задач по физике для 7–9 класса : учеб. пособие / В. И. Лукашик, Е. В. Иванова. – Минск : Аверсэв 2016. – 240 с.

Some methodological aspects of the use of a mobile phone in the educational process, in particular, in the study of physics in high school, are shown.

Кондратьев Олег Геннадьевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, oleg01.04.1999@mail.ru.

Научный руководитель – *Тарковский Викентий Викентьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, tarkovsky@grsu.by.

УДК 501

И. Ю. КРУПНИК

МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ «ПОЛУПРОВОДНИКИ» В СРЕДНЕЙ ШКОЛЕ

Рассматривается методика изучения полупроводников в разделе «Электрический ток в различных средах». Содержание этой темы в настоящее время нельзя признать окончательно установленным в связи с бурным развитием и применением полупроводников в технике и приборостроении, что требует выбора вопросов, которые имеют наибольшую научную и практическую значимость и в то же время доступны для понимания учащихся.

Значение учебного предмета «Физика» определяется той ролью, которую играет физическая наука в жизни современного общества, ее влиянием на темпы развития научно-технического прогресса, развитие культуры человека, формирование социально значимых ориентаций, обеспечивающих гармонизацию отношений человека с окружающим миром. Практическая деятельность любого современного человека в быту, на производстве, на отдыхе сопряжена с использованием полупроводниковых приборов. В этой связи нам представляется, что для гармонизации отношений с внешним миром человеку необходимо иметь представления

о наблюдаемых физических явлениях: свечении светодиода, лазера, действии транзисторов. Изучение этих явлений в школе является важной и актуальной задачей образования. Не полностью раскрывая этот раздел физики, мы понижаем общий фон физических знаний в очень важной области научно-технического развития общества, прививаем его членам отрешенное сугубо потребительское отношение к достижениям научно-технического прогресса.

В физику полупроводников необходимо вводить основные представления зонной теории об энергетических уровнях и зонах, которые вполне доступны пониманию учащихся и усваиваются не труднее классического электронного газа. Как известно, основным положением зонной теории является представление о твердом теле как о совокупности атомов или ионов, упорядоченно расположенных в кристаллической решетке. Электрические свойства твердых тел определяются зонной структурой энергетического спектра электронов. Основной характеристикой твердого тела считается ширина запрещенной зоны, величина которой зависит от пространственного расположения атомов в кристаллической решетке. В связи с этим вначале необходимо дать понятие о дискретном изменении энергии атома, энергетических уровнях электронов и принципе Паули. Эти понятия вводятся при рассмотрении строения электронной оболочки изолированного атома. После этого необходимо ознакомить учащихся с некоторыми свойствами совокупности атомов, объединенных в твердом теле, и в связи с этим дать понятие об энергетических зонах.

Учащимся сообщают, что каждому электрону, вращающемуся вокруг ядра атома по стационарной (разрешенной) орбите, соответствует вполне определенная величина энергии, которая тем больше, чем дальше от ядра находится орбита электрона. Поэтому все электроны атома обладают вполне определенными, дискретными значениями энергии, отделенными друг от друга широкими запретными значениями. Эти разрешенные энергетические состояния электронов в атоме называют энергетическими уровнями. При определенных условиях электрон может переходить с одного уровня на другой, но не может находиться в промежуточном (запрещенном) состоянии. Для того чтобы электрон перешел со своего уровня на более высокий, ему необходимо сообщить некоторую энергию. Обратный переход электрона на более низкий уровень сопровождается выделением энергии, причем как поглощение, так и выделение энергии электроном происходит не непрерывно, а строго определенными порциями – квантами. Учащимся известно, что электрон обладает электрическим зарядом и массой. Дополнительно к этому необходимо дать понятие о спине, как об одном из элементарных свойств электрона. Благодаря наличию спина электрон по своим свойствам напоминает элементарный магнетик, который во внешнем магнитном поле может устанавливаться только в двух противоположных направлениях: по полю и против поля. Свойства атома определяются не только возможными значениями энергии его электронов, но и тем, какую энергию они имеют на самом деле. Чтобы выяснить этот вопрос, учащиеся знакомят с принципом Паули, согласно которому в любой системе (атоме, молекуле, кристалле) на каждом энергетическом уровне может находиться не более двух электронов, причем эти электроны отличаются друг от друга направлением своих спинов.

После этого рассматривают явление, когда несколько отдельных атомов, сближаясь, начинают участвовать в образовании твердого тела. В этом случае вследствие взаимодействия электрических и магнитных полей отдельных атомов каждый энергетический уровень атома (как основной, так и возбужденный) «расщепляется» на несколько близких по величине, но все же различных уровней, число которых равно числу взаимодействующих атомов. Эти уровни образуют полосу, или энергетическую зону. Густота расположения энергетических уровней в каждой зоне зависит от размеров твердого тела: чем больше размеры тела, тем больше уровней в каждой зоне и тем гуще они расположены. Разность энергий двух соседних уровней составляет примерно 10^{-23} эВ. Это число определяется тем, что ширина зоны не превышает нескольких электрон-вольт, а число атомов в одном кубическом сантиметре твердого тела равно примерно 10^{23} . В твердом теле значительных размеров энергетические уровни в зонах расположены практически непрерывно.

В результате этого перемещения электронов в пределах одной зоны может осуществляться под действием теплового движения, так как средняя энергия атома при комнатной температуре равна примерно 0,04 эВ, т. е. она во много раз больше, чем разность энергий между двумя соседними уровнями зоны. Если все уровни зоны заняты электронами, то последние могут лишь меняться местами. Следует заметить, что в очень тонкой кристаллической пленке расстояние между отдельными уровнями в зоне может составлять десятые доли электрон-вольта. В этом случае заметно изменяются электрические свойства кристалла. Ширина энергетических зон зависит также от расстояния между атомами: по мере уменьшения межатомных расстояний ширина зон возрастает, при этом соседние зоны могут даже перекрывать друг друга. Наибольшее «расщепление» испытывают уровни валентных электронов. Разрешенные энергетические зоны отделяются друг от друга промежутками – уровнями энергии, в которых не могут находиться электроны. Эти уровни составляют запрещенные зоны. Зону, в которой находятся валентные электроны, называют валентной зоной. Наряду с разрешенными и запрещенными энергетическими уровнями в твердом теле существуют еще так называемые уровни возбуждения, на которых разрешается пребывать электронам с более высокими значениями энергии. Для перехода на эти уровни электроны должны получить извне необходимое количество энергии. Возбужденные уровни составляют зону проводимости. Наиболее близкие к ядру электроны внутренних

оболочек настолько прочно связаны со своими ядрами, что в обычных условиях не могут покинуть пределы атомов и превратиться в электроны проводимости.

Поэтому в процессе электропроводности принимают участие только электроны, находящиеся в валентной зоне и расположенной над ней зоне проводимости. Энергетическая протяженность этих зон составляет несколько электрон-вольт. Ширина же разделяющей их запрещенной зоны может изменяться от нескольких электрон-вольт до нуля и может быть даже отрицательной. Последнее соответствует случаю, когда разрешенные зоны перекрывают друг друга. В твердом теле, так же, как и в отдельном атоме, на каждом энергетическом уровне зоны может находиться не более двух электронов; энергетические зоны могут иметь различную степень заполнения электронами, а для перевода электрона из одной зоны в другую надо затратить энергию, равную ширине лежащей между ними запрещенной зоны. Таким образом, все электроны в твердом теле представляют собой единую систему и подчиняются тем же законам, что и электроны в отдельном атоме. Существенным отличием энергетических уровней электронов в твердом теле от таких же уровней в отдельном атоме является малое расстояние между ближайшими уровнями. Поэтому в твердом теле нельзя, например, по спектру различить дискретные энергетические состояния электронов. В отдельном атоме энергетические уровни более раздвинуты, поэтому они проявляются в линейчатых спектрах. В зависимости от структуры энергетических зон и степени заполнения их электронами твердое тело может быть проводником электрического тока или изолятором. В металлах уровни валентной зоны перекрываются с уровнями зоны проводимости. Другими словами, в металлах ширина запрещенной зоны равна нулю и валентные электроны легко могут переходить из одной зоны в другую.

Поэтому проводимость металлов очень велика. В диэлектриках валентная зона заполнена электронами полностью, а выше расположенная пустая зона проводимости отделена от нее широкой запрещенной зоной. Переход электронов из валентной зоны в зону проводимости возможен только в случае приложения высокой энергии. При обычных же условиях этот переход невозможен. Поэтому проводимость диэлектриков практически отсутствует. В полупроводниках ширина запрещенной зоны очень мала и для перехода электронов из заполненной валентной зоны в зону проводимости достаточно небольшой энергии, имеющейся у электронов при комнатной температуре. Так, для германия ширина запрещенной зоны равна 0,75 эВ, для кремния она составляет 1,12 эВ. Зонная теория не отличается особой наглядностью, поэтому при объяснении ее основных положений следует предостеречь учащихся от неправильного понимания таких важнейших понятий, как энергетический уровень, энергетическая зона и др. При отсутствии должного разъяснения этих понятий некоторые учащиеся могут спутать энергетическую схему кристалла с его пространственной схемой, утверждая, что заполненная зона – это та часть тела, где есть электроны, а запрещенная зона – где они отсутствуют. Учащимся необходимо разъяснить, что нельзя представлять себе твердое тело, состоящим из энергетических зон, занимающих какой-то объем, или представлять себе электроны, территориально расположенными в определенных зонах. Ничего подобного, конечно, нет. Теория энергетических зон отражает лишь то обстоятельство, что электроны в твердом теле могут обладать только вполне определенной величиной энергии. Само же твердое тело построено не из зон и уровней, а из материальных частиц – атомов и молекул. Энергетическая зона не имеет никаких пространственных размеров. Она представляет собой лишь физическое понятие, согласно которому электроны твердого тела могут обладать энергиями, заключенными в определенных пределах. Этими пределами являются нижняя и верхняя границы зоны. Электроны в твердом теле находятся не в зонах, а либо на орбитах своих атомов, либо в движении от атома к атому, либо в пространстве между атомами.

Список литературы

1. Бугаев, А. И. Методика преподавания физики в средней школе. Теоретические основы : учеб. пособие для студ. пед. ин-тов по физ.-матем. спец. / А. И. Бугаев. – М. : Просвещение, 1981. – 288 с.
2. Буров, В. А. Методика изучения полупроводников в школе / В. А. Буров. – М. : Просвещение, 1965. – 156 с.
3. Методика преподавания физики в 8–10 классах средней школы / В. П. Орехов [и др.] ; под ред. В. П. Орехова, А. В. Усовой. – М. : Просвещение, 1980. – Ч. 1. – 320 с.

The technique of studying semiconductors in the section «Electric current in various environments» is considered. The content of this topic at present cannot be recognized as finally established. In connection with the rapid development and application of semiconductors in engineering and instrumentation. Which requires the selection of questions that are of the greatest scientific and practical importance and at the same time are available for students to understand.

Крупник Иван Юрьевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, ivan-krupnik@mail.ru.

Научный руководитель – *Ануфрик Славмир Степанович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, anufrick@grsu.by.

Э. В. ПОЛУДЕНЬ

ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД: МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ В ШКОЛЬНОМ КУРСЕ ФИЗИКИ

Раскрыты понятия фундаментальной физической константы и элементарного электрического заряда. Представлена методика изучения элементарного электрического заряда. Приведены задачи и лабораторные работы по нахождению элементарного электрического заряда.

Фундаментальные физические константы – постоянные, используемые при описании фундаментальных законов природы и свойств материи. Фундаментальные физические константы определяют точность, полноту и единство наших представлений об окружающем мире. В этой роли фундаментальные физические константы могут выступать как набор величин, возникающих в теоретических моделях наблюдаемых явлений и входящих в качестве универсальных коэффициентов в соответствующие математические выражения [1].

Физические постоянные встречаются на протяжении изучения всего курса физики. Фундаментальные физические постоянные рассматриваются как отдельные величины и как величины, входящие в основные физические законы и закономерности. Задачи на нахождение фундаментальных физических констант можно решать как во время знакомства с данной фундаментальной постоянной, так и при введении новых формул в последующем изучении курса физики.

При решении количественных и экспериментальных задач, а также при проведении экспериментальных работ по нахождению фундаментальных постоянных происходит усвоение физического смысла фундаментальной постоянной, а также закрепление ее числового значения.

Одна из фундаментальных физических постоянных – это элементарный электрический заряд.

Методика изучения элементарного электрического заряда состоит из следующих шагов, необходимо:

1. Ввести обозначение элементарного электрического заряда. При знакомстве с элементарным зарядом, как и с любой другой величиной, необходимо ввести её обозначение для дальнейшего ее распознавания.
2. Вести определение и единицы измерения элементарного электрического заряда.
3. Раскрыть физический смысл константы. При раскрытии физического смысла элементарного заряда необходимо рассказать связь данной величины с физическими законами, в которых она встречается.
4. Рассказать историю открытия элементарного электрического заряда.
5. Решение количественных и качественных задач на определение данной фундаментальной физической константы.
6. Проведение лабораторного эксперимента на определение элементарного заряда. Лабораторный эксперимент можно провести как демонстрационный опыт, так и при помощи виртуальных лабораторий и компьютерных моделей.

Элементарный электрический заряд обозначается буквой e . Элементарный электрический заряд – фундаментальная физическая постоянная, минимальная порция (квант) электрического заряда. Равен приблизительно $e = 1,602176565(35) \cdot 10^{-19}$ Кл в Международной системе единиц (СИ). Тесно связан с постоянной тонкой структуры, описывающей электромагнитное взаимодействие.

Любой наблюдаемый в эксперименте электрический заряд всегда кратен одному элементарному – такое предположение было высказано Б. Франклином в 1752 году и в дальнейшем неоднократно проверялось экспериментально. Электрический заряд может быть двух типов: положительный (при трении кожи о стекло) и отрицательный (при трении меха с эбонитом). Тела, имеющие электрические заряды одного знака, отталкиваются друг от друга, тела с зарядами противоположных знаков – притягиваются.

Элементарный заряд был экспериментально измерен американским ученым Робертом Эндрюсом Милликеном в 1910 году и российским ученым Абрамом Федоровичем Иоффе в 1913 году. В этих опытах заряженная очень маленькая капля (в опытах Р. Э. Милликена) или пылинка цинка (в опытах А. Ф. Иоффе) «зависала» между заряженными пластинками. Электрическая сила $F_{эл}$, компенсирующая силу тяжести F_m , зависела от заряда капельки (пылинки), что позволило ученым судить о значении этого заряда. Заряд капельки масла (пылинки) не мог принимать любое значение. Это значение всегда было кратно одному и тому же числу $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл [2].

Количественные задачи на нахождение элементарного электрического заряда:

1. В процессе электризации на эбонитовую палочку перешло $7,0 \cdot 10^{11}$ электронов, в процессе этого она приобрела заряд $q = -11,2 \cdot 10^{-19}$ Кл. Чему равен заряд электрона?
2. Два электрона находящиеся друг от друга на расстоянии $2 \cdot 10^{-8}$ см. Отталкиваются с силой $6 \cdot 10^{-4}$ Н. Определите заряд электрона.

3. Шарик массой 10 г движется с ускорением 0,5 см/с² в однородном электрическом поле с напряженностью 3·10⁴ В/м. Чему равен электрический заряд шарика, если он находится в невесомости?

4. Разность потенциалов между двумя пластинами равна 900 В. Частица пролетает из состояния покоя расстояние между пластинами со скоростью 1,8·10⁷ м/с. Чему равен заряд частицы?

5. Частица переместилась в ускоряющем поле из точки с потенциалом 200 В в точку с потенциалом 300 В. Кинетическая энергия равна 16·10⁻¹⁸ Дж, а приобретенная скорость – 6·10⁶ м/с. Чему равен заряд частицы? Начальную скорость частицы считать равной нулю.

6. Минимальная скорость электрона, которая необходима для ионизации атома водорода, равна $v_{\min} = 2,19 \cdot 10^6$ м/с при потенциале ионизации атома $U_i = 13,6$ В. Чему равен элементарный заряд в этом опыте?

Лабораторная работа «Нахождение элементарного электрического заряда методом электролиза»

Цель работы: определение элементарного электрического заряда методом электролиза.

Оборудование: весы, разновесы, угольные электроды с держателем, амперметр, источник постоянного тока, реостат, стакан, раствор медного купороса, часы с секундной стрелкой, выключатель, соединительные провода.

Вывод расчётных формул

Электрический заряд, перенесённый ионами при их движении через электролит в течение промежутка времени t при силе тока I , равен

$$Q = I \cdot t.$$

С другой стороны, этот же заряд можно выразить через число ионов N , нейтрализовавшихся на одном электроде, и величину заряда одного иона q или элементарный электрический заряд e и валентность иона n :

$$Q = N \cdot q = N \cdot ne.$$

Из этого следует

$$I \cdot t = N \cdot ne.$$

Если масса каждого иона m_0 , то масса выделившегося на электроде вещества Δm равна

$$\Delta m = N \cdot m_0 = N \cdot \frac{M}{N_A}$$

где M – молярная масса вещества, N_A – число Авогадро.

Делением выражение получим формулу для нахождения элементарного электрического заряда

$$e = \frac{I \cdot t \cdot M}{\Delta m \cdot n N_A}.$$

Мы получили, что для определения на опыте элементарного электрического заряда e достаточно измерить силу тока I , проходящего через электролит, время его прохождения t и массу выделившегося вещества. Массу вещества, выделившегося на катоде в результате электролиза, можно найти как разность масс электрода до и после опыта, т. е. $\Delta m = m_2 - m_1$

Ход работы:

1. Определите взвешиванием массу m_1 угольного электрода, который будет служить катодом.
2. Поместите электроды в раствор медного купороса и соберите цепь по схеме, показанной на рисунке 1.

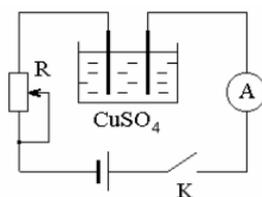


Рисунок 1 – Схема цепи для электролиза

3. Замкните цепь ключом К, быстро установите реостатом силу тока в цепи равной 0,6–1 А и поддерживайте её постоянной в течение промежутка времени t (15–25 мин). Время засекайте с помощью секундомера в момент включения тока.

4. По истечении времени разомкните цепь, снимите электрод, на котором выделилась медь, просушите его.
5. Затем определите массу электрода m_2 и массу меди, выделившейся на нем при электролизе:

$$\Delta m = m_2 - m_1$$

6. Используя результаты измерений вычислите величину элементарного электрического заряда по формуле:

$$e = \frac{I \cdot t \cdot M}{\Delta m \cdot n N_A}$$

7. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.

№	$m_1, \text{кг}$	$m_2, \text{кг}$	$I, \text{А}$	$t, \text{с}$	$e, \text{Кл}$
1					
2					
<					

Ответьте на контрольные вопросы:

1. В чём заключается физический смысл элементарного электрического заряда?

2. Можно ли, используя данный метод измерения элементарного заряда, повысить точность результата? Как?

3. Почему дистиллированная вода не проводит электрический ток?

Таким образом, при изучении элементарного электрического заряда можно использовать разработанное учебно-методическое обеспечение, включающее методические рекомендации по изучению данной фундаментальной физической константы, историю её открытия, количественные задачи на нахождение значения элементарного электрического заряда, лабораторную работу по определению значения данной константы.

Список литературы

1. Каршенбойм, С. Г. Фундаментальные физические константы: роль в физике и метрологии и рекомендованные значения / С. Г. Каршенбойм // Успехи физических наук. – 2005. – Т. 175, № 3. – 298 с.

2. Исаченкова, Л. А. Физика : учеб. для 9 кл. учреждений общ. сред. образования с рус. яз. обучения / Л. А. Исаченкова, Г. В. Пальчик, А. А. Сокольский ; под ред. А. А. Сокольского. – 2-е изд., перераб. – Минск : Народная асвета, 2015. – 221 с. : ил.

3. Физика : учеб. пособие для 10 кл. учреждений общ. сред. образования с рус. яз. обучения / Е. В. Громько [и др.]. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2013. – 272 с.

4. Жилко, В. В. Физика : учеб. для 11-го кл. учреждений общ. сред. образования с рус. яз. обучения / В. В. Жилко, Л. Г. Маркович ; под ред. А. А. Сокольского. – 2-е изд., перераб. – Минск : Народная асвета, 2014. – 286 с. : ил.

5. Исаченкова, Л. А. Физика : учеб. для 7-го кл. учреждений общ. сред. образования с рус. яз. обучения / Л. А. Исаченкова, Ю. Д. Лещинский ; под ред. Л. А. Исаченковой. – 2-е изд., перераб. – Минск : Народная асвета, 2017. – 167 с. : ил.

6. Физика. Астрономия. 7–11 кл. : примерное календарно-тематическое планирование : пособие для учителей учреждений общ. сред. образования / И. В. Галузо [и др.]. – Минск : НИО : Аверсэв, 2016. – 90 с.

The concept of a fundamental physical constant is revealed. The concept of an elementary electric charge is revealed. A method for studying the elementary electric charge is presented. Tasks and laboratory work on finding an elementary electric charge are presented.

Полудень Элеонора Валерьевна, студентка физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, elapoluden@gmail.com.

Научный руководитель – *Харазян Оксана Гагиковна*, кандидат педагогических наук, заместитель декана факультета довузовской подготовки Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, kharazian@gmail.com.

УДК 37.016:53

Е. Ю. РОДЦЕВИЧ

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТОДОМ ГРАНИЦ

Рассмотрены способы расчёта погрешностей косвенных измерений через частные производные и через натуральные логарифмы. Подробно описан расчёт погрешности косвенного измерения методом границ. Рассмотрен пример расчёта погрешности косвенных измерений методом границ.

Для нахождения прямых и косвенных измерений необходимо выполнить расчёты погрешностей. Прямые измерения – это измерения, при которых искомое значение физической величины находят непосредственно из опытных данных. Косвенные измерения – это измерения, при котором значение физической величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, найденными в результате прямых измерений [1]. Например, для определения объёма шарика можно измерить с помощью штангенциркуля его диаметр (прямое измерение) и затем по известной формуле рассчитать объём (косвенное измерение). Если же для измерения объёма использовать мензурку с водой, то такое измерение объёма будет прямым.

Расчёт косвенных измерений проводится двумя способами через частные производные и через натуральные логарифмы.

Согласно первому способу необходимо:

1. Вычислить абсолютную погрешность по формуле:

$$\Delta_z = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a} \Delta_a\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b} \Delta_b\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial c} \Delta_c\right)^2 + \dots}$$

2. Найти относительную погрешность, через формулу:

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta_z}{z} \cdot 100\%$$

Таким образом, первый способ через частые производные – это погрешность произведения и частного.

Согласно второму способу необходимо:

1. Вычислить относительную погрешность через натуральные логарифмы по формуле:

$$\varepsilon_z = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln z}{\partial a} \Delta_a\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln z}{\partial b} \Delta_b\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln z}{\partial c} \Delta_c\right)^2 + \dots}$$

2. Найти абсолютную погрешность по формуле:

$$\Delta_z = \frac{z \varepsilon_z}{100}$$

Таким образом, нахождение погрешности через натуральные логарифмы – это погрешность суммы и разности.

Так как в школе учащиеся не изучают производные, они не могут рассчитать погрешность косвенных измерений через частные производные и через натуральные логарифмы, поэтому для расчёта косвенных измерений можно использовать метод границ.

В общем случае результат косвенного измерения y является некоторой функцией от результатов прямых измерений: $\langle a \rangle \pm \Delta a, \langle b \rangle \pm \Delta b \dots$. В качестве окончательного результата используется значение функции, вычисленное при средних значениях результатов прямых измерений [2]:

$$y = F(\langle a \rangle, \langle b \rangle, \dots)$$

Для оценки погрешности косвенного измерения через метод границ можно воспользоваться следующим алгоритмом.

1. Нужно найти верхнюю и нижнюю границу результата, используя верхние и нижние границы значений величин, входящих в формулу для нахождения искомой величины. Т. е. смотря на формулу, необходимо понять, как максимально увеличить результат, подставляя верхние или нижние границы измеренных значений. Знания арифметики должны нам подсказать, что, чтобы получить больше, в числитель дроби надо поставить верхнюю границу, а в знаменатель – нижнюю, это приведет к увеличению дроби; чтобы получить больше, надо уменьшаемое сделать больше, а вычитаемое – меньше.

2. В полученных границах лежит искомое значение. Чтобы сравнивать это значение с методом интервалов, необходимо оценить абсолютную погрешность найденного значения.

3. Нужно рассчитать разность между верхней и нижней границей.

4. Необходимо произвести округления (до разряда сотен) и записать значение.

Рассмотрим пример расчета погрешностей косвенных измерений:

При смешивании горячей и холодной воды мы имеем следующие результаты измерений:

Температура холодной воды: $t_1 = (15 \pm 1)^\circ\text{C}$.

Температура горячей воды: $t_2 = (72 \pm 1)^\circ\text{C}$.

Температура смеси: $t = (52 \pm 1)^\circ\text{C}$.

Масса холодной воды: $m_x = (80 \pm 1,5) \cdot 10^{-3} \text{ кг}$.

Масса горячей воды: $m_2 = (100 \pm 3) \cdot 10^{-3} \text{ кг}$.

Рассчитаем количество теплоты, полученное холодной водой и отданное горячей при смешивании и сравнить полученные значения в пределах погрешности.

$$Q_{\text{пол}} = cm_x(t - t_x) = 12432 \text{ Дж.}$$

$$Q_{\text{отд}} = cm_2(t_2 - t) = 8400 \text{ Дж.}$$

Вычислим верхнюю границу количества теплоты, полученного холодной водой.

Так как количество теплоты определяется умножением, то максимальное количество теплоты получится, если взять для каждого из множителей максимальное значение, то есть верхние границы интервалов значений с погрешностью. А максимальное значение разности получится, если для уменьшаемого взять верхнюю границу значения, а для вычитаемого – нижнюю. Полученное значение будет верхней границей значения количества теплоты [4]:

$$Q_{\text{пол,в}} = cm_{\text{хв}}(t_{\text{в}} - t_{\text{хн}}) = 13349,7 \text{ Дж.}$$

$$Q_{\text{пол,н}} = cm_{\text{хн}}(t_{\text{н}} - t_{\text{хв}}) = 11539,5 \text{ Дж.}$$

В полученных границах лежит искомое значение. Для того, чтобы сравнить это значение с количеством теплоты, нужно оценим абсолютную погрешность найденного значения количества теплоты.

$$\Delta Q = \frac{Q_{\text{в}} - Q_{\text{н}}}{2} = \frac{13349,7 + 11539,5}{2} = 1244,6 \text{ Дж.}$$

$$Q_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{в}} + Q_{\text{н}}}{2} = \frac{13349,7 - 11539,5}{2} = 905,1 \text{ Дж.}$$

Проведём округление и запишем количество теплоты, полученного холодной водой:

$$Q_{\text{пол}} = 12500 \pm 910 \text{ (Дж).}$$

Рассчитаем таким же образом границы значения количества теплоты, отданного горячей водой.

$$Q_{\text{отд,в}} = cm_{\text{гв}}(t_{\text{гв}} - t_{\text{н}}) = 9517,2 \text{ Дж.}$$

$$Q_{\text{отд,н}} = cm_{\text{гн}}(t_{\text{гн}} - t_{\text{в}}) = 7740 \text{ Дж.}$$

$$\Delta Q = \frac{9517,2 - 7740}{2} = 888,6 \text{ Дж} \approx 890 \text{ Дж.}$$

$$Q_{\text{ср}} = \frac{9517,2 + 7740}{2} = 8628,6 \text{ Дж} \approx 8600 \text{ Дж.}$$

$$Q_{\text{отд}} = 8600 \pm 890 \text{ (Дж).}$$

Таким образом метод границ позволяет легко и быстро рассчитать погрешности косвенных измерений. Поскольку для использования данного метода не нужно находить производные, его можно использовать при выполнении экспериментальных работ на уроках физики.

Список литературы

1. Фокин, С. А. Обработка результатов измерений физических величин / С. А. Фокин. – СПб., 2003. – С. 62.
2. Воронов, В. В. Педагогика школы в двух словах : учеб. пособие для студ. пед. вузов / В. В. Воронов. – М. : Педагогическое общество, 2000. – 192 с. : ил.
3. Физика. Астрономия. 6–11 кл. : примерное календарно-тематическое планирование : пособие для учителей учреждений общ. сред. образования / И. В. Галузо [и др.]. – Минск : НИО : Аверсэв, 2017.
4. Ивашкина, Д. А. Оценка погрешности косвенных измерений методом границ [Электронный ресурс] / Д. А. Ивашкина. – 2017. – Режим доступа: <https://d-a-ivashkina.jimdofree.com>.

Methods for calculating errors of indirect measurements are considered: through partial derivatives and through natural logarithms. The calculation of the error of indirect measurement by the boundary method is described in detail. An example of calculating the error of indirect measurements using the boundary method is considered.

Родцевич Елизавета Юрьевна, магистрант 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, liza.sergey.2017@gmail.com.

Научный руководитель – *Харазян Оксана Гагиковна*, кандидат педагогических наук, заместитель декана факультета довузовской подготовки Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, kharazian@gmail.com.

А. В. СТЕПУРА

ГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ОБУЧЕНИИ ФИЗИКЕ В СРЕДНЕЙ ШКОЛЕ

Актуальность применения графического метода на уроках физики связана со спецификой методов решения задач, изложения нового материала, обеспечивающего лучшее понимание и усвоение знаний, и характеризуется большей наглядностью и разнообразием дидактических приёмов. На уроках физики графики широко используются для обработки результатов экспериментов и в качестве средства для изучения и визуализации теоретических основ физических явлений.

В информационном обществе все более востребованы умения воспринимать и перекодировать информацию, в частности информацию о явлениях разной природы (физических, химических, психологических, педагогических, социальных и т. п.), представленную с помощью графиков изменения с течением времени состояния того или иного объекта и графиков зависимости между величинами.

На уроках физики графики используются при обработке данных эксперимента, полученных в ходе лабораторных и практических работ, при решении задач графическим методом и при изучении нового материала [1; 2]. В рамках именно этого предмета школьники изучают законы и явления природы, которые предоставляют наибольшие возможности для переноса на реальные жизненные ситуации.

Цель исследования: теоретически обосновать и разработать методику формирования умений работать с графиками на уроках физики у учащихся средней школы.

В соответствии с поставленной целью и предметом исследования определены следующие задачи исследования:

- на основе анализа научной, учебно-методической и учебной литературы выявить состояние проблемы формирования умений работать с графиками у учащихся средней школы;
- выявить обобщенные способы работы с графиками на уроках физики;
- рассмотреть основные виды графических упражнений и задач по физике;

Большинство учебников по методике физики посвящены разработке методов и приемов физического эксперимента в школе, так как основным методом на уроках физики является экспериментальный метод [3]. Однако использование других методов и приемов изложения материала, в частности графического метода, является также необходимым условием осмысленного усвоения учащимися основ физики. Использование графического метода на уроках физики и в самостоятельной работе учащихся также окажет плодотворное влияние на осуществление взаимосвязи между физикой и математикой как предметами [4].

Значение графического метода в изучении физики велико. Можно утверждать, что использование графиков является необходимым условием сознательного усвоения учебного материала, развития более ясного понимания физических законов и закономерностей. Графическое изображение физического процесса делает его более наглядным и тем самым облегчает понимание рассматриваемого явления, способствует развитию абстрактного мышления, интуиции, способности анализировать и сравнивать, находить более рациональные пути решения задач. Кроме того, использование графического метода помогает укрепить связи между физикой и математикой, заполняя абстрактные математические модели определенным физическим содержанием.

На графике четко показан «ход» физической закономерности в виде геометрического изображения. График может показать то, что ученик сможет себе представить только на гораздо более высоком уровне своего математического развития в виде аналитического выражения функциональной зависимости.

Графики играют важную роль в выполнении различных упражнений, без которых невозможно обеспечить сознательное усвоение учениками основ физики. Они играют не менее важную роль в обработке и анализе результатов лабораторных работ.

Графические упражнения, которые заменяют различные вычисления, требуют меньшего мыслительного напряжения, чем сами вычисления. С этой точки зрения, графический метод должен использоваться достаточно широко для переключения различных видов деятельности, учащихся на уроке в классе. В этом случае овладение принципами графического метода постепенно становится навыком, который ученик может использовать в своей дальнейшей практической деятельности.

Графики доступны для учеников разных возрастов, по крайней мере, для классов, изучающих физику.

Графические изображения могут быть использованы для закрепления полученных знаний, их развития и применения.

Выделяют следующие приемы работы с графиками, которые составляют целостную систему: работа с готовыми графиками – «чтение» графиков, графические упражнения, решение задач графическим способом, графическое отображение результатов измерений (во время лабораторных работ), самостоятельное построение графиков. Применение каждого из приемов имеет конкретные цели.

Графические задачи – задачи в условии или в процессе решения которых используются графики, диаграммы, таблицы, рисунки и схемы. Наиболее распространенными в обучении физике являются графики линейных функций, графики тригонометрических функций; реже – более сложные функциональные зависимости. Иногда встречаются графики, которые содержат несколько участков, соответствующих различным характеристикам физического процесса.

Чаще всего графики используются при решении задач по механике (кинематика, динамика, законы сохранения, механические колебания и волны), при изучении тепловых явлений (изменения агрегатных состояний вещества, молекулярная физика и термодинамика в 10 классе). Реже – в задачах по электричеству, электромагнетизму (особенно в 10–11 классах), в квантовой физике (фотоэффект в 11 классе).

Графики могут быть использованы на всех этапах, при решении как расчетных, так и качественных задач.

Трудности в освоении решения графических задач связаны не только с нехваткой времени на изучение и отсутствием необходимого набора таких задач в соответствующих сборниках, но и с обобщением накопленной базы данных задач, разбросанных по разным учебникам.

Графический метод решения определенных физических задач соответствует педагогически целесообразно, поскольку ученик одновременно приобретает навыки работы с линейкой и лекалом, умение выбирать сетку и масштаб (в графических упражнениях), наносить результаты отдельных вычислений на координатную сетку, приблизительно оценивать степень погрешности результата и т. д.

Таким образом, графики помогают наглядно представить физическую задачу или ее решение.

Графические задачи позволяют более четко и понятно выразить функциональные зависимости между величинами, которые характеризуют процессы, происходящие в окружающей природе и технике (особенно при изучении различных видов движения в механике, газовых законов). В некоторых случаях только графики могут представлять процессы, которые могут быть выражены аналитически только на более поздних этапах обучения физике.

Постановка и решение различных задач не только в обобщении и систематизации знаний, но и в процессе обучения позволит учащимся освоить содержание курса физики, а также логические приемы (сравнения, анализа, моделирования, конкретизации, синтеза и др.), которые лежат в основе решения задач.

Графический метод решения задачи позволяет определить степень самостоятельности постановки и решения проблемы учащимися. С помощью графических заданий создаются проблемные ситуации и тем самым активизируется умственная деятельность учащихся. Необычная постановка вопроса в таких задачах и последующее обсуждение результатов вызывают интерес учащихся.

Список литературы

1. Абдурахманов, С. Д. Исследовательские работы по физике в 7–8 классах сельских школ / С. Д. Абдурахманов. – М.: Просвещение, 1990. – 112 с.
2. Бутырский, Г. А. Классификация графических задач по физике и проблемы обучения их решению / Г. А. Бутырский // Вестник Вятского ГГУ. – 2010. – № 1. – С. 141–146.
3. Громцева, О. И. Контрольные и самостоятельные работы по физике. 7 класс : к учебнику А. В. Перышкина «Физика. 7 класс» / О. И. Громцева. – М.: Изд-во «Экзамен», 2013. – 109 с.
4. Использование графического метода и идеи симметрии при решении физических задач в школе : метод. пособие / Р. Я. Ерохина [и др.]. – Воронеж, 1994. – 246 с.
5. Земцова, В. И. Формирование знаний о физических величинах в процессе решения задач / В. И. Земцова. – Свердловск : СПИ, 1991. – 86 с.

The relevance of applying the graphical method in physics lessons is related to the specifics of problem solving methods, the presentation of new material that provides better understanding and assimilation of knowledge and is characterized by greater clarity and variety of didactic techniques. In physics lessons, graphics are widely used to process the results of experiments and as a means to study and visualize the theoretical foundations of physical phenomena.

Степура Александр Викторович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, alex.stepura@mail.ru.

Научный руководитель – *Ануфрик Славмир Степанович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, anufrick@grsu.by.

УДК 372.853

А. А. ШЛЫК

НЕОБХОДИМОСТЬ РАННЕЙ ЗАИНТЕРЕСОВАННОСТИ УЧАЩИХСЯ ПРЕДМЕТОМ «ФИЗИКА» ПОСРЕДСТВОМ ИНТЕРНЕТ-ОЛИМПИАД

Рассмотрен вопрос ранней заинтересованности, мотивации учащихся предметом «Физика» при помощи внедрения в повседневную работу на уроке инновационных технологий и привлечения интереса к интернет-олимпиаде.

Предмет «Физика» является основой естественнонаучного образования. Успехи в его усвоении, как и в обучении в целом, невозможны без формирования положительного отношения учащихся к ее изучению. При правильно организованном обучении изучение физики способствует формированию творческих способностей учащихся, их мировоззренческих взглядов и убеждений, воспитанию высоко нравственной личности. Эта основная цель обучения будет достигнута только тогда, когда в процессе обучения будет сформирован на раннем этапе и не утерян на следующих этапах интерес к знаниям, так как только при условии, если ученику интересно на уроке, может быть достигнут эффект сопереживания, пробуждающего определенные нравственные чувства учащихся.

Сегодня информационные технологии являются неотъемлемой частью нашей жизни и, конечно же, они внедряются в образовательный процесс. Ни для кого не секрет, что цели и задачи современного образования – это не усвоение знаний, а формирование компетентностей. На данный момент важнейшим стал личностно-ориентированный подход. Сейчас во всех школах есть доступ в интернет, а это позволяет пользоваться различными электронными ресурсами, что, в свою очередь, способствует внедрению новых педагогических технологий в учебно-воспитательный процесс.

Если говорить о применении инновационных технологий на уроках физики, именно они являются основным признаком положительных результатов творческой деятельности. Более того, это влечет за собой повышение мотивации обучающихся, стимулирует желание учиться.

Интернет создаёт уникальную возможность для изучающих физику: пользование виртуальными лабораторными работами, наблюдение различных опытов и экспериментов, общение с носителями знаний по физике; облегчение поиска информации; работа может проводиться как оперативно, так и отсрочено (то есть в зависимости от задания, ученик может искать необходимую ему информацию не только дома, но и на уроке, если это позволяет оснащение кабинета); информация, получаемая из сети всегда новая, (соответствует реальному времени, что позволяет развивать познавательную деятельность учащихся); поиск информации помогает развивать не только поисковые, но и другие навыки (непосредственно используя материалы сети разной степени сложности); использование интернета помогает повышать мотивацию учащихся (мотивация учащихся на уроке формируется на основе обсуждения не только вопросов к текстам учебника, но и проблем, интересующих всех и каждого). Благодаря интернету происходит ускорение темпов урока, появляется возможность импровизации, возможность отхода от классической структуры урока; обучение происходит в сотрудничестве (совершенствуются умения письменной речи, благодаря индивидуальному или письменному составлению ответов партнерам, участие в подготовке рефератов, сочинений, других эпистолярных продуктов совместной деятельности партнеров); интернет способствует двустороннему саморазвитию (не только ученик, но и учитель совершенствует свои навыки и умения).

Исследование в рамках школы № 26 г. Гродно 7–9 классов проводилось по следующим вопросам:

1. Тебе нравится физика?

- а) не очень;
- б) нравится;
- в) не нравится.

2. Мне очень нравится учить физику, расширяя свои знания о мире.

- а) почти не имеет значения;
- б) частично значимо;
- в) заметно значимо;
- г) очень значимо.

3. Мне очень нравится, если на уроке организуют совместную с ребятами работу (в паре, бригаде, команде).

- а) почти не имеет значения;
- б) частично значимо;
- в) заметно значимо;

г) очень значимо.

4. Любите ли вы / нравится ли вам проводить опыты по физике?

5. Любите ли вы / нравится ли вам участвовать в физических олимпиадах?

6. Любите ли вы / нравится ли вам выступать с докладами по физике?

7. Мне не нравится выполнять учебные задания по физике, если они ...

а) требуют сильного умственного напряжения;

б) слишком легкие и не требуют усилия;

в) требуют «зубрежки» и выполнения по шаблону;

г) не требуют сообразительности, смекалки;

д) мне не нравится выполнять учебные задания почти всегда;

е) другое.

8. Я посещаю с удовольствием внеклассные мероприятия по физике (0, 1, 2)

9. Мне нравится выполнять творческие задания с использованием дополнительного материала (0, 1, 2)

10. Мне нравится работать самостоятельно на уроке (0, 1, 2)

11. Я буду более активным на уроке физики, если ...

а) хорошо знаю тему и понимаю учебный материал;

б) смогу справиться с предлагаемым учителем заданием;

в) считаю нужным всегда так поступать;

г) меня не будут ругать за ошибку;

д) я уверен, что отвечу хорошо;

е) когда мне так хочется;

ж) другое ...

12. Моя цель на уроках физики:

а) усвоить материал, научиться объяснять различные процессы и явления;

б) общение с друзьями и учителями на научные темы;

в) получать хорошие оценки;

г) провести время;

д) не определена;

е) другое ...

13. Полученные знания на уроках физики я применяю при выполнении заданий по другим предметам или в повседневной жизни:

а) да;

б) иногда;

в) нет, недостаточно знаний;

г) не знаю, как можно использовать знания и умения по физике в других областях.

14. Ищешь ли ты объяснения тому, что еще не понимаешь? (да, нет).

15. Ты часто просишь объяснить явления, происходящие вокруг тебя? (да, нет).

16. Я нахожу собственные способы выполнения задания (0, 1, 2)

17. Дополнительные, необязательные задания, которые предлагает учитель, я:

а) всегда выполняю;

б) обычно начинаю, но могу не довести до конца;

в) выполняю, если есть свободное время;

г) не выполняю.

18. Тебе интересно выполнять задания из интернета? (да, нет).

19. Тебе интересно поучаствовать в интернет-олимпиаде по физике? (да, нет).

20. При решении задач в домашних заданиях по физике я использую интернет:

а) всегда;

б) часто, если не справляюсь с задачей самостоятельно;

в) редко;

г) никогда.

21. Мне бы хотелось в качестве домашнего задания по физике:

а) решать задачи в тетради;

б) писать рефераты;

в) искать дополнительную информацию в интернете;

г) выполнять компьютерный тест в интернете.

Результаты показали, что физика, как предмет, учащимся нравится и интересна. Для учащихся всех классов значимо проведение совместной работы на уроке (в парах, бригадах, командах). Это свидетельствует

тому, что для них интересна нестандартная форма проведения занятий. Участие в интернет-олимпиаде вызывает положительные эмоции.

Выполнение творческих заданий с использованием дополнительного материала из интернета, заинтересовывает учащихся 7–9 классов. Основная цель учащихся на уроке физики – это усвоить материал, научиться объяснять различные процессы и явления; получить знания для общения с друзьями и учителем на научные темы. Школьникам достаточно трудно находить собственные способы выполнения задания. Это говорит о том, что следует проводить Интернет-олимпиаду в несколько дополнительных этапов, первый из которых будет с задачами среднего уровня из школьной программы. Это будет проводиться с той целью, чтобы привлечь большее количество школьников, чтобы у недостаточно подготовленных учеников не пропал интерес к предмету. После опроса стало заметно, что с взрослением падает интерес к заданиям из Интернета, но не до критичного. Высокий интерес к интернет-олимпиадам наблюдается у 7 классов. В 8–9 классах уровень достаточно мал. Учащимся 7 классов хотелось бы в качестве домашней работы по физике получать задания, связанные с поиском дополнительной информации в Интернете и выполнением компьютерных тестов в Интернете. В 8 классах приоритет направлен на написание рефератов и поиск дополнительной информации в Интернете. В 9 классах интересна любая форма работы, за исключением решения задач.

Возможности сети интернет и творческий потенциал педагога могут дать возможность для поиска интересных находок и достижения целей в заинтересованности предмета физика у учащихся. Переход от обычной олимпиады к интернет-олимпиаде в настоящее время становится логичным и практичным. Учащиеся, проживающие в отдаленных от города населенных пунктах, не имеющие возможности добраться до районных и областных центров, могут с легкостью принять участие в интернет-олимпиаде.

Список литературы

1. Горкин, А. П. Краткий энциклопедический словарь / А. П. Горкин. – М. : Большая Российская энциклопедия, 2000. – Т. 1. – 459 с.
2. Горкин, А. П. Краткий энциклопедический словарь / А. П. Горкин. – М. : Большая Российская энциклопедия, 2000. – Т. 2. – 465 с.
3. Каменецкий, С. Е. Методика решения задач по физике в средней школе : Кн. для учителя / С. Е. Каменецкий, В. П. Орехов. – М. : Просвещение, 1987. – С. 3–254.
4. Осяк, С. А. Изучение причин снижения познавательного интереса к физике у учащихся IX классов общеобразовательных школ и путей его повышения : автореф. дис. ... канд. пед. наук : 13.00.02 / С. А. Осяк ; Моск. гос. обл. ун-т. – М., 1999. – 23 с.
5. Педагогика. Педагогические теории, системы, технологии / С. А. Смирнов [и др.]. – Изд. центр «Академия», 2000. – 92 с.
6. Положение о 1–3 этапах республиканской олимпиады по учебным предметам учащихся учреждений общего среднего, профессионально-технического и среднего образования : утв. приказом управления образования Гродненского облисполкома от 06.10.2014 № 276.
7. Положение об олимпиаде школьников «Интернет-олимпиада школьников по физике» : утв. проректором по учебной работе Санкт-Петербургского государственного университета, зам. Председателем оргкомитета Е. Г. Бабелюк.
8. Тулькибаева, Н. Н. Задачи межпредметного содержания и методы их решения : учеб. пособие / Н. Н. Тулькибаева, А. Ф. Зубов. – Челябинск, 1993. – 94 с.
9. Усова, А. В. Дидактические игры на уроках : метод. рек. / А. В. Усова. – Челябинск : Изд-во ЧГПИ «Факел», 1994. – 32 с.
10. Усова, А. В. Развитие у учащихся познавательного интереса к физике : метод. рек. для студ. и учителей шк. / А. В. Усова, В. В. Завьялов, В. И. Лырчикова. – Челябинск, 1979. – 25 с.
11. Усова, А. В. Учебные конференции и семинары по физике в средней школе. Пособие для учителей / А. В. Усова, В. В. Завьялов. – М. : Просвещение, 1975. – 111 с.
12. Фабрикант, В. А. Физическая наука и образование / В. А. Фабрикант // Проблемы преподавания физики. – М, 1978. – 64 с.
13. Физика / пер. с англ. А. Ахманаева. – М. : Наука, 1965. – 899 с.

This article discusses the issue of early interest, motivation of students with a subject in physics with the introduction of innovative technologies into everyday work at the lesson and attracting interest in the Internet Olympiad.

Шлык Анастасия Александровна, студентка 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, shlykanastasia99@mail.

Научный руководитель – *Сенько Анна Николаевна*, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники, физико-технический факультет Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, asenko@mail.

М. Г. ЩАСТНЫЙ

ПОВЫШЕНИЕ ИНТЕРЕСА УЧАЩИХСЯ СРЕДНИХ ШКОЛ К ФИЗИКЕ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ЕЁ СОВРЕМЕННЫХ ДОСТИЖЕНИЙ

Раскрыты причины понижения интереса к предмету «Физика», представлены возможные варианты использования современных достижений физики и общества для повышения и поддержания интереса к физике, дополнительные виды работ и творческих занятий.

В последнее время наблюдается сильное снижение интереса учащихся школ к изучению предмета физики. Этому способствует различные причины и факторы. Первое, что можно выделить, это низкий уровень подготовленности учителя физики, для работы с детьми. Прежде всего, на учебно-воспитательный процесс влияет уровень научно-теоретической подготовки учителя, его эрудиция. Затем, конечно же, педагогическое мастерство, определяемое умением применять разнообразные методы и приёмы обучения, а также разнообразные организационные формы учебных занятий, умением учитывать возрастные и индивидуальные особенности учащихся. Вторая причина – гуманитаризация образования, которая проявляется в появлении большого количества специальностей, с гуманитарными направлениями. Такие как: психология, журналистика, менеджмент, маркетинг и т. д. Третья, установившееся представление об этой науке, только как о двигателе технического прогресса, то есть физика воспринимается особым и специфическим предметом, который к тому же с полным правом считается одним из самых сложных для изучения, вследствие недостаточных сведений о применимости физических знаний в конкретной профессиональной деятельности, за исключением, пожалуй, технических специальностей [1].

Физика занимает особое место среди школьных дисциплин. Как учебный предмет она направлена на формирование у учащихся научной картины мира. Физика формирует творческие способности учащихся, их мировоззрение и убеждения, способствует воспитанию высоко нравственной личности. Эта основная цель обучения может быть достигнута только тогда, когда в процессе обучения будет сформирован интерес к знаниям. Повысить интерес возможно разными способами. Для начала надо привить интерес к предмету, организовать деятельность учащихся, при этом поддерживать возникший интерес и внимание. Далее, учителю, требуется выяснить, насколько хорошо они его знают, и сконцентрировать их внимание на вопросах, которые изучены недостаточно хорошо. Для этого перед изучением темы предлагается учащимся письменно ответить на ряд вопросов. При ответах учащиеся допускают неточности или не отвечают вообще, и тогда на следующем уроке заостряется их внимание на недостаточно изученных вопросах. Изменяется структура урока. Повторение перестает быть изолированным элементом урока, оно органически связывается с изучением нового материала. Открываются возможности усвоения учебного материала в основном на уроке, а на дом даётся учащимся больше заданий творческого, проблемного характера [2].

В современных школах, в семьях учеников, даже самолично у учеников, имеются мини-компьютер, а это позволяет получить доступ к Интернету в любое время. Компьютерная коммуникация позволяет получить доступ к практически неограниченным массивам информации, хранящейся в централизованных банках данных. Это даёт возможность при организации учебного процесса опираться на весь запас знаний, доступных жителю информационного общества. Ученикам не придётся. Но зачастую ученики не особо проявляют желание к получению информации. Это способствует внедрению новых педагогических технологий в учебно-воспитательный процесс. Все уроки, на которых используется мультимедийный проектор, для проецирования содержания записей «на доске» учителем запоминаются проще, и информация легче усваивается, а также всем в классе будет хорошо виден материал, отображенный более чётко, ясно и образцово. Использование мультимедийных презентаций целесообразно на любом этапе урока, что позволяет оперативно сочетать разнообразные средства обучения, способствующие более глубокому и осознанному усвоению изучаемого материала, экономии времени на уроке, насыщению его информацией. Крайне удобно иметь разработанную и систематизированную медиатеку уроков – презентации по всем разделам курса физики. Эта работа трудная и кропотливая, но в то же время очень интересная. Вместе с учащимися выбирается тема исследования, учитель помогает анализировать полученную информацию, а затем обобщить, выделить главное и исключить второстепенное. Очень важно, чтобы представленные материалы отвечали не только содержанию исследования, но и эстетическим требованиям. На компьютере можно показать такие явления и эксперименты, которые недоступны непосредственному наблюдению, например, эволюцию звезд, ядерные превращения, квантование электронных орбит и т. п. С помощью моделей из виртуальной лаборатории, созданной в проектной среде можно смоделировать процессы, происходящие в циклотроне, масс-спектрометре, показать движение электронов в магнитном поле. Демонстрация опытов, микропроцессов, которые нельзя проделать в школе, возможна без показа реальных экспериментов [3].

Современное информационное общество ставит перед всеми типами учебных заведений задачу подготовки выпускников, способных:

- ориентироваться в меняющихся жизненных ситуациях, самостоятельно приобретая необходимые знания, применяя их на практике для решения разнообразных возникающих проблем;
- самостоятельно критически мыслить, видеть возникающие проблемы и искать пути рационального их решения, используя современные технологии; чётко осознавать, где и каким образом приобретаемые ими знания могут быть применены; быть способными генерировать новые идеи, творчески мыслить;
- грамотно работать с информацией (собирать необходимые для решения определённой проблемы факты, анализировать их, делать необходимые обобщения и аргументированные выводы, применять полученный опыт для выявления и решения новых проблем);
- быть коммуникабельными, контактными в различных социальных группах, уметь работать сообща в различных областях, в различных ситуациях, предотвращая или умело выходя из любых конфликтных ситуаций;
- самостоятельно работать над развитием интеллекта, культурного уровня [4].

Задачи они выполняют несомненно, но могут ли они привить интерес? Нынешние пособия по физике сильно отстали во времени и им крайне не хватает интересной информации, об изученном материале, в конце параграфа. Ученикам будет крайне интересно где же встречаются или используются физические явления, законы, свойства. Это многократно повысит познавательный интерес детей, а в каком-то роде даже и улучшит понимание пройденной темы. Также, изучая новую тему, можно выделить отдельный этап урока, на котором ученики узнают, где же будут применяться полученные знания из этой темы, показаны примеры из новейших и самых современных достижений физики. Для этого могут использоваться научные статьи, из специализированных журналов, посвящённые современным открытиям в физике, новости о новейших прорывах в сфере физики, специально подготовленный видеоряд, где будет продемонстрировано наглядно явление или закон, проходимой темы, презентация либо просто устный рассказ учителя, что применяться должно крайне редко. Всё это повысит познавательный интерес учеников, а также их мотивацию, что облегчит им изучение нового материала, а учителю его объяснение.

Естественные лабораторные работы проводятся по классической схеме с использованием, в том числе наборов по электродинамике. В качестве индивидуальных творческих заданий ученикам предлагается создание модельных приборов (например, простейший электрический пробник для низковольтных электрических сетей) или разработка простейших электрических цепей практического применения.

Для проведения виртуальных лабораторных работ по электродинамике разработан комплект работ с использованием компьютерного продукта «Electronics Workbench». Эта программа предназначена для конструирования и моделирования различных электронных схем. Она располагает достаточно большим набором средств для исследования: вольтметры, амперметры, омметры, двулучевой осциллограф и генераторы различных сигналов.

Учащимся предлагается два варианта работ:

- Лабораторные работы с уже подготовленными электрическими схемами и перечнем задач, которые они должны выполнить. Задачи включают в себя снятие параметров работы электрических схем, наблюдение реакции электрических схем при изменении параметров ее элементов.
- Лабораторные работы, которые требуют самостоятельного создания электрических схем по приведенному заданию. Они также требуют от учащихся снятия параметров работы, наблюдения реакции электрических схем при изменении параметров их элементов.

В качестве индивидуальных творческих заданий используются следующие:

- Самостоятельная разработка различных электрических и радиотехнических схем.
- Ученики при этом пользуются домашними компьютерами, а у кого их нет, занимаются в компьютерных классах лицея в специально отведенное для них время.
- Задания выдаются либо индивидуально или так называемой творческой группе, состоящей из 2–3 человек.
- Научно исследовательские работы, которые носят долговременный характер, и предназначены для выступления и защиты на научно-практических конференциях учащихся.

Научно-исследовательские работы учащихся занимают особое место при внедрении инновационных технологий обучения. Это вызвано следующими причинами:

- необходимостью внедрения индивидуально-ориентированного обучения, направленного в первую очередь на отдельно взятую личность обучаемого с учетом всех его умственных и психофизиологических особенностей и выбранной специализации дальнейшего обучения;
- приобщения учащихся к современным методам проведения физических экспериментов, таких, например, как компьютерное моделирование физических явлений и использование современных вычислительных средств для измерения различных физических величин;

- развития интеллекта ученика, его творческого и научного мышления, формирование научного мировоззрения [5].

Также, одним из важнейших компонентов повышения интереса учащихся к образованию, является разработка и внедрение в учебную деятельность элективных и факультативных курсов по предмету. Данные курсы играют важную роль в системе профильного обучения на старшей ступени школы. Они связаны, прежде всего, с удовлетворением индивидуальных образовательных интересов, потребностей и склонностей каждого школьника. Именно они по существу и являются важнейшим средством построения индивидуальных образовательных программ, т. к. в наибольшей степени связаны с выбором каждым школьником содержания образования в зависимости от его интересов, способностей, жизненных планов, таким образом, в какой-то мере можно говорить о социальном заказе общества. Выполняя такой заказ, сбора и анализа пожеланий учеников, мной были разработаны следующие курсы:

- «История физики»
- «Углубление физики через решение задач»
- «Физика и техника»
- «За страницами учебника физики»
- «Углубленное изучение физики через решение задач»
- «Решение логических задач»
- «Физика и методы научного познания»

Как элемент системы инновационного образования, элективные и факультативные курсы, кроме лично-ориентированного подхода к обучению позволяют решить следующие задачи при изучении физики:

- углубить знания о методах научного познания на основе знакомства с алгоритмами наблюдения, эксперимента, теоретического мышления;
- сформировать умения систематизации наблюдений, проведения экспериментальных исследований, использования измерительных приборов;
- сформировать умения использования языка физики для анализа научной информации;
- сформировать умения применения полученных знаний при объяснении явлений природы [6].

В заключение можно отметить, что активизировать познавательный интерес учащихся можно на различных этапах урока и различными методами. Необходимо создавать атмосферу интереса к знаниям, стремление искать, исследовать, творить, вносить техническую смекалку, оживлять уроки элементами занимательности, всесторонне использовать средства современной техники, побуждать учащихся задавать вопросы учителю, товарищам, практиковать индивидуальные задания, требующие знаний, выходящих за пределы программы, использовать дополнительную литературу при подготовке различного рода сообщений учениками. Именно интересное преподавание приводит к интересному учению, поэтому их в совокупности следует считать одним из основных критериев ценности учебного процесса.

Список литературы

1. Бугаев, А. И. Методика преподавания физики в средней школе / А. И. Бугаев. – М. : Просвещение, 1984. – 288 с.
2. Гербутов, В. Б. Концепция физического образования / В. Б. Гербутов. – Минск : Учительская газета, 1996. – 26 с.
3. Иванова, Л. А. Активизация познавательной деятельности учащихся при изучении физики : пособие для учителей / Л. А. Иванова. – М. : Просвещение, 1983. – 160 с.
4. Исаченкова, Л. А. Физика : учеб. пособие для 9 кл. учреждений общего среднего образования с рус. яз. обучения / Л. А. Исаченкова, А. А. Сокольский, Е. В. Захаревич. – Минск : Аверсэв, 2019. – 208 с.
5. Нигматуллин, Р. Н. Компьютерное тестирование как эффективный способ контроля знаний: современное состояние и пути развития / под общ. ред. д-ра пед. наук, проф. В. А. Комелиной. – Казань : ТРИ «Школа», 2013. – 176 с.
6. Харазян, О. Г. Курсовые и дипломные работы. Методические рекомендации по подготовке, оформлению и защите / О. Г. Харазян. – Гродно : ГрГУ, 2015. – 47 с.

The reasons for the decrease in interest in the subject of physics are revealed, possible options for using modern achievements of physics and society to increase and maintain interest in physics, additional types of work and creative activities are presented.

Щастный Марк Геннадьевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, wertgolam@gmail.com.

Научный руководитель – *Тарковский Викентий Викентьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, tarkovsky@grsu.by.

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. ИЗУЧЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ
КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Nguyen Quang San. Quantum effects for channeling in a bent crystal	3
Акулич В. А., Малец М. А., Патапович М. П. Образование нанопорошков Al и AlO при обработке алюминия серией мощных сдвоенных лазерных импульсов	6
Акулич В. А., Захожий А. О., Патапович М. П. Спектральные исследования продуктов обработки алюминия мощными сдвоенными лазерными импульсами в атмосфере воздуха	10
Аль-Камали М. Ф. С. Х., Алексеенко А. А. Мишени для магнетронного распыления, формируемые золь-гель методом и параметры тонких плёнок, получаемых на их основе	12
Альхименов А. И., Азарко И. И., Игнатенко О. В., Паршутич С. Ф. Синтез кубического нитрида бора в системе BN–Al при воздействии высоких давлений и температур.....	14
Анушкевич И. А. Определение температуры и концентрации электронов лазерно-эмиссионной плазмы при её формировании сдвоенными лазерными импульсами	17
Баззал Ходор, Коваленко М. Н. Спектральные исследования процессов образования нанопорошков Al и AlO при воздействии на алюминий мощными сдвоенными лазерными импульсами в атмосфере воздуха	20
Баззал Ходор. Исследования процессов образования нанопорошков алюминия в плазме при воздействии расфокусированных сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевую мишень в атмосфере воздуха	23
Белько Н. В., Мальтанова А. М. Фотоэлектрохимическая активность наноразмерных H*-агрегатов индотрикарбодиаминового красителя	25
Ващенко К. Ю., Саенко Р. О., Саенко О. В. Термодинамические характеристики вязкого течения водных растворов рибита и ксилита	27
Вербицкая М. С., Жидкина Н. В., Запороженко Ю. В., Аксютин А. В. Модификация свойств поверхности полиметилметакрилата после обработки в холодной плазме атмосферного разряда	30
Вишневецкий П. А. Модификация структуры и свойств цветных металлов лазерным излучением	32
Галенко Е. Н., Шарко С. А. Термоэлектрические характеристики тонких слоёв золота в зависимости от условий получения	34
Гетало А. Н., Микитенко В. А., Кузьменко Г. М., Хлопов А. М. Исследование оптических свойств фторзамещённого гептилового спирта	36
Губаревич И. К. Визуализация формы поверхности металлического образца, подвергнутого лазерному воздействию	38
Даденков И. Г. Импульсная запись нестационарных решёток в фоторефрактивных кристаллах силиката висмута	39
Евдокимов А. Модификация заэвтектического силуминового сплава Al–20Si компрессионными плазменными потоками	42
Есипенко Д. В., Гуркинов М. С. Влияние хрома на кинетику окисления титана	44
Жернак М. А., Курьян Н. Н. Использование наночастиц серебра для увеличения интенсивности анализируемых спектральных линий цветных металлов	46
Жидкина Н. В., Вербицкая М. С., Яцкевич Е. В., Аксютин А. В. Модификация свойств поверхности стекла обработкой в плазме атмосферного разряда	49
Зерница Д. А. Исследование быстрозатвердевших фольг сплавов (Sn-Zn) _{эвт} – 4 мас. % (Sb) и (Sn-Zn) _{эвт} – 4 мас. % (Al)	52
Карпач П. В. Спектры ИК поглощения флуоресцентных фотохромных наноструктур	54
Кирикович П. С. Ёмкостные значения клеточных мембран биологических объектов, полученных биоимпедансным способом	56
Колесникова Е. А. Термическая стабильность плёнок антимонида индия (InSb), полученных методом взрывного термического испарения	58
Латыпов Р. С. Фазово неоднородная термоэлектрическая керамика на основе слоистого кобальтита кальция.....	60
Лахмицкий Н. В. Исследование процессов окисления ультрадисперсных алмазов детонационного синтеза при отжиге на воздухе.....	63

Левченко Ю. В., Хорольский А. В. Эффективные радиусы макромолекул бычьего сывороточного альбумина, рассчитанные по данным о сдвиговой вязкости его водных растворов	66
Лычагина Ю. А. Спектральные свойства нового дикарбоцианинового красителя, модифицированного полиэтиленгликолем	68
Мартынова А. А., Шуревич А. А., Орехова Н. А. Исследования химического состава гранитов карьера Микашевичи методом лазерной атомно-эмиссионной спектрометрии	70
Мартынова А. А., Дубровская О. В., Орехова Н. А. Исследования химического состава диоритов карьера Микашевичи методом лазерной атомно-эмиссионной спектрометрии	72
Матюшевская А. Д. Спектральные свойства индотрикарбоцианинового красителя при комплексообразовании с белками сыворотки крови человека	74
Пантелеева Е. П. Электрически управляемые планарные жидкокристаллические элементы	77
Плигин Е. И. Спектральные свойства нового бензтиазолового красителя	79
Прилуцкий С. А. Термическая стабильность структуры и микротвёрдости циркония, обработанного компрессионными плазменными потоками	81
Прокопенко Т. А., Нечипуренко Н. И. Морфоструктурный анализ и лазерная атомно-эмиссионная спектрометрия фаций капель плазмы крови в диагностике у пациентов с цереброваскулярной патологией	84
Прокопенко Т. А., Нечипуренко Н. И. Использование морфоструктурного анализа и ИК спектров фаций капель плазмы крови для диагностики пациентов с цереброваскулярной патологией головного мозга	86
Римский Г. С. Кристаллическая структура и магнитные свойства твёрдых растворов $Mn_{1-x}Ti_xNiSb$ ($0,00 \leq x \leq 0,50$)	88
Семенчук Е. О. Исследование ранних стадий нагревания полиметилметакрилата при воздействии на его поверхность импульсного лазерного излучения	91
Ситкевич А. Л. Модификация кристаллической структуры меди под воздействием лазерного излучения	93
Скавыш Ю. О., Лещинская А. В., Григорьев А. С. Релаксационный процесс в структурированной воде на границе раздела фаз.	96
Скавыш Ю. О., Лещинская А. В. Релаксационный процесс в деионизованной воде.	98
Смолич П. А., Анучин С. Н. Спектральные свойства комплекса включения крезил фиолета с β -циклодекстрином	101
Сорока А. С. Экстраординарный эффект Холла в тонких магнитоупорядоченных плёнках пермаллоя	104
Степанюк Н. А. Сравнительный анализ элементного, фазового составов и механических свойств многокомпонентных систем $HfNbTaTiZr$ и $HfNbTaTiZrC_5$	106
Сугак Я. Н. Термическая стабильность аморфных сплавов на основе циркония, облучённых ионами гелия	108
Супоненко А. Ю., Зуев И. А., Таболич А. А. Антимикробная активность водорастворимых трикарбоцианиновых красителей	110
Титова А. В., Трубецкая А. С., Маслова Г. Т. Использование морфоструктурного анализа и ИК спектров высохших капель плазмы крови для диагностики опухолей головного мозга	113
Титова А. В., Трубецкая А. С., Маслова Г. Т. Морфоструктурный анализ и лазерная атомно-эмиссионная спектрометрия фаций капель плазмы крови в диагностике опухолей головного мозга	115
Халифаева Ш. Х., Абдуллаев С. Ф., Маслов В. А. Межгодовые вариации содержания тяжёлых металлов в составе атмосферного аэрозоля юго-центральной части Таджикистана	117
Цветков В. А. Сдвиг полос комбинационного рассеяния в твёрдых растворах «кремний–германий», обработанных водородной плазмой	120
Шевелёва В. В. Кинетика высокотемпературного окисления циркония, модифицированного плазменными потоками	122
Шершнев О. А. Теоретическое исследование действия сил светового давления на полистироловые наночастицы в биологическом материале	124
Якобчук Е. И. Генерационные характеристики кумариновых красителей со структурой бихромофоров при когерентной накачке	126

Секция 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ФИЗИКЕ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Аксенова А. Ю. Моделирование теплопроводности композиционных систем с учётом межфазного теплового сопротивления.....	131
Арсенович В. А. Изменения в межпозвоночном диске при переходе позвоночника из вертикального положения в горизонтальное.....	133
Базарбек А. Б., Сагатов Н. Е. Определение влияния магнитного порядка на уравнение состояния фосфидов железа с помощью компьютерного моделирования.....	134
Бушкевич И. А., Мирошниченко Н. Д., Пешко М. Н. Анализ распределения включений интерметаллидных фаз по размерам в отожжённых фольгах сплава 1421 системы Al–Mg–Li	136
Кирикович П. С. Активное сопротивление внутриклеточной жидкости биологических объектов, полученных биоимпедансным способом	139
Корниенко А. А., Лапко М. Л. Влияние конфигурационного взаимодействия на интенсивности полос поглощения иона празеодима в индий-фторидных стёклах	140
Курапцова А. А. Распределение генерированных солнечным светом носителей заряда и тока в гетероструктуре кремний / наночастица оксида титана	142
Ромашкевич А. О. Ионный ветер в устройствах оперативного пламягашения	146
Сакович К. А. Принцип работы «нечестного рандома»	150
Чекель А. В. Определение диффузионного потока жидкости в межпозвоночном диске	152
Шекелевский В. В. Алгоритм определения профиля распределения плотности ионного тока в магнетронной распылительной системе	154

Секция 3. ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Андрукевич А. П. Оценивание метрологических характеристик стандартных образцов рН	158
Белов И. П., Лоташинский А. С., Коренной Р. Р. Шестиканальный измеритель давления для настройки ДВС на основе микроконтроллера семейства STM32	159
Бобнис А. Ч. Измерительные трансформаторы напряжения и тока: назначение, классификация, основные нормируемые характеристики	161
Бондарик Б. А. Устройство для определения номинала монет на базе микроконтроллера ATmega328	164
Бородавко Н. П. Метрологический контроль средств измерений параметров электробезопасности	168
Босякова А. Г. Лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия медной монеты.....	170
Валюк С. И. Оценивание метрологических характеристик эталонов (стандартных образцов) влажности	172
Дробыш Д. А. Анализ качества электроснабжения предприятий и организаций	174
Дробыш Д. А. Сравнение кристаллических и тонкоплёночных солнечных панелей	177
Жернак М. А., Курьян Н. Н. Методы получения наночастиц серебра	179
Жинко Н. А. Изучение работы синхронного двигателя, преимущества и недостатки его использования	183
Журавская К. В. Измерение скорости распространения звука в воздухе методом фигур Лиссажу в лабораторном практикуме	186
Залого В. И. Реконструкция системы освещения участка № 2 цеха Аммиак-3 предприятия ОАО «Гродно Азот»	188
Занько А. И., Леонович Н. В. Расчёт газового потока в установке плазмохимического осаждения	191
Коренной Р. Р., Белов И. П., Лоташинский А. С. Программное обеспечение микроконтроллера семейства STM32, используемого в шестиканальном измерителе давления для настройки ДВС	193
Купчевский А. Т., Кобылянец Я. Д. Термостатирование при измерении вязкости	196
Ланевский А. В. Создание амплитудно-модулированного лазерного излучения для измерения скорости света	198
Ларин А. О. Исследование свойств магнитно-мягких композиционных материалов в диапазоне частот гармонических колебаний до 100 кГц	200
Лоташинский А. С., Коренной Р. Р., Белов И. П. Мобильное приложение для шестиканального измерителя давления для настройки ДВС	204
Мешкевич Е. А. Асинхронные двигатели: принцип работы, применение, преимущества и недостатки	208

Пузырёв М. В., Прокопеня Д. П., Шульган Н. И. Лазерно-плазменный источник для осаждения в вакууме наноструктурированных нанопокровов	212
Рапей А. Г. 3D-технологии: будущее уже сегодня	215
Ромашкевич А. О. Ионный ветер в сверхлёгких летательных аппаратах	218
Собовая М. И., Коваленко М. Н., Минько А. А. Аппаратно-программный комплекс «СпектроТест»	222
Хомчик А. Ю. Влияние задержки между импульсами на интенсивность спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы бронзы	225
Хомчик А. Ю. Влияние энергии лазерных импульсов на интенсивность спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы бронзы	228
Ядешко А. Т. Проект энергоэффективного электроснабжения ООО «ПБН-Восток»	231
Янковский К. В. Автоматизация учёта ресурсов	233

Секция 4. АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Глебович В. И. Решение физических задач методом определения площади под графиком функции	235
Граевская С. И. Современные подходы систематизации и обобщения знаний учащихся по физике	237
Кишубаева А. Т., Базарбек А. Организация практико-ориентированного образования инженеров в вузе	240
Колосовская М. М. Решение качественных задач по физике с использованием интерактивной доски	242
Кондратьев О. Г. Использование мобильных приложений в изучении физики в средней школе	245
Крупник И. Ю. Методика изучения темы «Полупроводники» в средней школе	247
Полудень Э. В. Элементарный электрический заряд: методика изучения в школьном курсе физики	250
Родцевич Е. Ю. Оценка погрешностей косвенных измерений методом границ	252
Степура А. В. Графические методы в обучении физике в средней школе	255
Шлык А. А. Необходимость ранней заинтересованности учащихся предметом «Физика» посредством интернет-олимпиад	257
Щастный М. Г. Повышение интереса учащихся средних школ к физике на основе изучения её современных достижений	260