



УНИВЕРСИТЕТ  
НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА  
УНИВЕРСИТЕТА

**МАТЕРИАЛЫ  
XIX МЕЖДУНАРОДНОЙ МОЛОДЕЖНОЙ  
КОНФЕРЕНЦИИ ПО ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ  
И ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКЕ**

Научный совет по оптике и лазерной физике Российской академии наук  
Научный совет по люминесценции Российской академии наук  
Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН  
Институт геохимии СО РАН  
Иркутский государственный университет  
Иркутский филиал СО РАН  
Сибирское отделение Российской академии наук  
Совет научной молодежи ИЛФ СО РАН

**МАТЕРИАЛЫ  
XIX МЕЖДУНАРОДНОЙ МОЛОДЕЖНОЙ  
КОНФЕРЕНЦИИ ПО ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ  
И ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКЕ**

Иркутск, Россия, 3–8 июля 2023 г.



УДК 535  
ББК 22.34+22.37  
М34

Публикуется по решению Оргкомитета  
XIX международной молодежной конференции по  
люминесценции и лазерной физике

**Научный редактор**

*Е. Ф. Мартынович*, д-р физ.-мат. наук, проф.

М34 **Материалы XIX** Международной молодежной конференции по люминесценции и лазерной физике. Иркутск, Россия, 3–8 июля 2023 г. / Иркут. филиал ИЛФ СО РАН ; ФГБОУ ВО «ИГУ» ; [науч. ред. Е. Ф. Мартынович]. – Иркутск : Издательство ИГУ, 2023. – 247 с.

**ISBN 978-5-9624-2169-8**

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, посвященных актуальным проблемам лазерной физики: взаимодействию интенсивных сверхкоротких лазерных импульсов с веществом; исследованию одиночных атомов, молекул и других квантовых систем; применению лазерных и люминесцентных методов для создания, исследования и модификации объектов, используемых в медицине, биологии, химии, экологии; фундаментальным исследованиям искусственных квантовых систем, получаемых методами нано- и радиационных технологий. Представлена информация о разработках новых перспективных материалов, приборов и оборудования.

Предназначено для научных сотрудников, инженеров, преподавателей и студентов.

УДК 535  
ББК 22.34+22.37

ISBN 978-5-9624-2169-8

© Иркутский филиал ИЛФ СО РАН, 2023  
© ФГБОУ ВО «ИГУ», 2023

## SCALABLE HETERONUCLEAR ARCHITECTURE OF NEUTRAL ATOMS BASED ON EIT

A. M. Farouk<sup>1,2,3</sup>, I. I. Beterov<sup>1,3,4,5</sup>, P. Xu<sup>6,7</sup>, I. I. Ryabtsev<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Novosibirsk State University, Russia, Novosibirsk*

<sup>2</sup>*Faculty of Science, Al-Azhar University, Egypt, Cairo*

<sup>3</sup>*A.V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Russia, Novosibirsk*

<sup>4</sup>*Institute of Laser Physics SB RAS, Russia, Novosibirsk*

<sup>5</sup>*Novosibirsk State Technical University, Russia, Novosibirsk*

<sup>6</sup>*State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CAS, China, Wuhan*

<sup>7</sup>*Wuhan Institute of Quantum Technology, China, Wuhan*

Based on our recent paper [1], we propose a scalable heteronuclear architecture of parallel implementation of CNOT gates in arrays of alkali-metal neutral atoms for quantum information processing. We considered a scheme where we perform CNOT gates in a parallel manner within the array, while they are performed sequentially between the pairs of neighboring qubits by coherently transporting an array of atoms of one atomic species (ancilla qubits) using an array of mobile optical dipole traps generated by a 2D acousto-optic deflector (AOD). The atoms of the second atomic species (data qubits) are kept in the array of static optical dipole traps generated by spatial light modulator (SLM). The moving ancillas remain in the superposition of their logical ground states without loss of coherence, while their transportation paths avoid overlaps with the spatial positions of data atoms. We numerically optimized the system parameters to achieve the fidelity for parallelly implemented CNOT gates around  $F = 95\%$  for the experimentally feasible conditions. Our design can be useful implementation of surface codes for quantum error correction. Renyi entropy and mutual information are also investigated to characterize the gate performance. The results are accepted for publication in Journal of Experimental and Theoretical Physics [2].

*This work is supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 23-42-00031), <https://rscf.ru/project/23-42-00031/>.*

### References

1. A.M. Farouk, I.I. Beterov, P. Xu, S. Bergamini, I.I. Ryabtsev, preprint arXiv:2206.12176 [quant-ph] (2022).
2. A.M. Farouk, I.I. Beterov, P. Xu, I.I. Ryabtsev, «Scalable Heteronuclear Architecture of Neutral Atoms Based on EIT», *J. Exp. Theor. Phys.* (submitted).

## LINEAR AND NONLINEAR EXCITATION OF COLOR CENTERS IN A LIF CRYSTAL BY FEMTOSECOND LASER EMISSION

E. F. Martynovich<sup>1,2</sup>, A. S. Frolova<sup>2</sup>, D. Unurbileg<sup>3</sup>, E. Ulziybayar<sup>3</sup>,  
O. Bukhtsoozh<sup>4</sup>, J. Davaasambuu<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>*Irkutsk Branch of Institute of Laser Physics SB RAS, Russia, Irkutsk, [femto@bk.ru](mailto:femto@bk.ru)*

<sup>2</sup>*Irkutsk State University, Russia, Irkutsk*

<sup>3</sup>*Laser Research Center, National University of Mongolia,  
Mongolia, Ulaanbaatar, [davaasambuu@num.edu.mn](mailto:davaasambuu@num.edu.mn)*

<sup>4</sup>*Institute of Physics and Technology MAS, Mongolia, Ulaanbaatar*

Linear and nonlinear excitation of some color centers in lithium fluoride crystals has already been carried out earlier. In [1; 2], crystal samples were studied in which color centers were created in advance. Luminescence was excited by nanosecond pulses. The processes of excitation and luminescence occurred directly in the color centers without the participation of excitations of the main substance of the crystal. In works [3; 4], samples without color centers were studied. Femtosecond exciting laser radiation of relatively high power was used in these studies. This radiation caused interband ionization of the main substance of the crystal and the formation of color centers in  $F_2$  and  $F_3^+$  crystals [3]. In this case, up-conversion photoluminescence was observed during femtosecond irradiation. The spectra of such luminescence were similar to the luminescence spectra of the same color centers excited by light in the linear regime in the spectral bands of optical absorption of these centers due to singlet transitions.

In this work, we studied crystals in which color centers were formed in advance due to preliminary irradiation with gamma radiation. To excite luminescence, femtosecond laser radiation of a much lower power was used. It could not cause interband transitions and create new color centers. A Rainbow 2<sup>TM</sup> titanium-sapphire laser with the following characteristics was used: 6 ns, 1000 Hz, average power up to 300 mW, spectral region of generation  $\sim$  670–900 nm, focusing lens 4x. The excitation power was varied using a THORLABS NDC-50C-2M-B rotary attenuator. Luminescence spectra were recorded with an Ocean Optics HR4000CG-UV-NIR spectrometer. The luminescence spectra of the color centers contained in the test sample were preliminarily recorded in the linear excitation mode, and the luminescence growth and decay kinetics were recorded. For this, we used a MicroTime 200 confocal scanning luminescent microscope coupled with an Ocean Optics QE65000 spectrometer. In this case, the luminescence was excited by low-power picosecond diode lasers with different wavelengths. The results are presented in Fig. 1.

The intensity of band 1 increases linearly with the intensity of the exciting femtosecond radiation, band 2 (570 nm) increases quadratically. All spectral bands, except for band 2, are linearly excited by low-power radiation. The intensity of band 1 increases linearly with the intensity of the exciting femto-

second radiation, band 2 (570 nm) increases quadratically. All spectral bands, except for band 2, are linearly excited by low-power radiation.

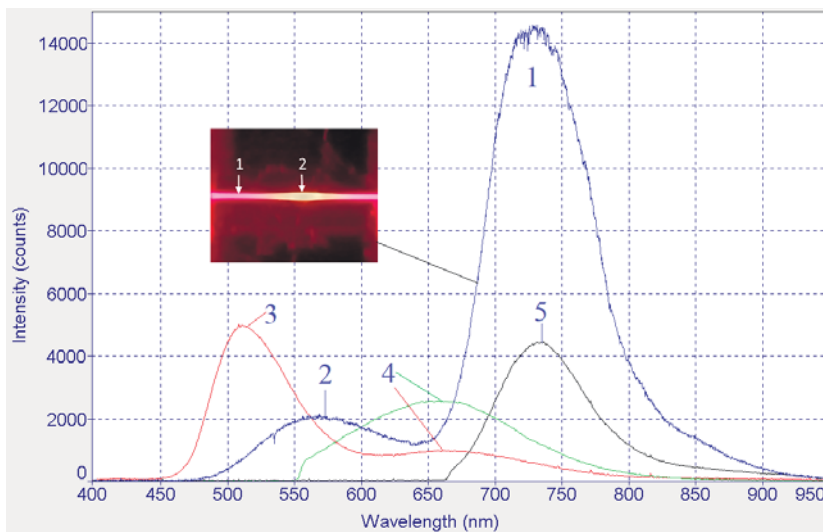


Fig. The color inset shows a photograph of the luminescent channel in the region of the focus of the exciting femtosecond radiation. The color and luminescence spectra before focus (1) and in focus (2) are different. The spectrum with peaks 1 and 2 was recorded upon excitation with femtosecond radiation, the bands with peaks 3, 4, and 5 were recorded with low-power excitation

It is concluded that the nonlinearly excited luminescence band 2 is due to quantum transitions in the system of triplet levels  $F_3^+$  of color centers. Previously, it was not recorded during femtosecond excitation.

## References

1. V.V. Ter-Mikirtychev, T. Tsuboi, *Phys. Status Solidi B*, 190(2), 347–351 (1995).
2. T.T. Basiev, I.V. Ermakov, K.K. Pukhov, *Proc. SPIE*, 3176, 160–166 (1997).
3. E.F. Martynovich, D.V. Balyunov, A.V. Kuznetsov, A.V. Kirpichnikov, V.I. Trunov, E.V. Pstryakov, S.N. Bagaev, *Izv. vuzov. Fizika*, 52(12-3), 191–197 (2009).
4. Y. Zhang, Q. Zhao, H. Pan, C. Wang, J. Qian, Z. Wang, *Chin. Opt. Lett.*, 14(8), 083201 (2016).

## COLOR REGULATION FOR RARE-EARTH/LIQUID-CRYSTALS COMPOSITES

X. Sang<sup>1,2</sup>, F. Song<sup>1,2</sup>, R. Xu<sup>1,2</sup>, J. Yang<sup>1,2</sup>, Z. Zhao<sup>1,2</sup>,  
M. Feng<sup>1,2</sup>, W. Huang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*School of Physics & The Key Laboratory of Weak Light Nonlinear Photonics,  
Nankai University, Ministry of Education P. R. China, Tianjin*

<sup>2</sup>*Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University,  
P. R. China, Taiyuan*

<sup>3</sup>*Key Laboratory of Flexible Electronics & Institute of Advanced Materials,  
Jiangsu National Synergetic Innovation Center for Advanced Materials,  
Nanjing Tech University, P. R. China, Nanjing, [iamwhuang@njtech.edu.cn](mailto:iamwhuang@njtech.edu.cn)*

Emitting color regulation has many applications in display, anti-counterfeiting, and communication. In this work, rare earth (RE)/liquid crystal (LC) composites have been successfully obtained. The interaction between RE and LCs is analyzed through both experiments and theoretical. The energy transfer of the radiative reabsorption mechanism and the Förster-type resonance energy transfer mechanism plays a role in the energy transfer from LCs host to RE ions. The Judd-Ofelt theory has confirmed the improvement of the luminescence performance of RE ions by LC hosts. By utilizing the interaction between the RE complexes and LCs, multiple methods are used to achieve the color regulation of the RE/LC composites. Furthermore, reversible regulation of emitting color is achieved. The preparation of composites with color regulation is conducive to the further expansion of the application of RE luminescent materials and LCs.

## PIV MEASUREMENTS IN A BUBBLY FREE JET TO STUDY ITS TURBULENCE STRUCTURE

A. S. Severin<sup>1,2</sup>, B. B. Ilyushin<sup>1</sup>, K. S. Pervunin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*S. S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,  
Russia, Novosibirsk, [ilyushin@itp.nsc.ru](mailto:ilyushin@itp.nsc.ru)*

<sup>2</sup>*Faculty of Physics, Novosibirsk State University, Russia, Novosibirsk, [a.severin@g.nsu.ru](mailto:a.severin@g.nsu.ru)*

<sup>3</sup>*Department of Chemical Engineering, Imperial College London,  
United Kingdom, London, [k.pervunin@imperial.ac.uk](mailto:k.pervunin@imperial.ac.uk)*

Single- and two-phase shear flows are of great scientific interest due to their frequent prevalence in nature and wide practical use in numerous industrial processes. In spite of multiple experimental data on shear flows available in the literature, including results of PIV measurements, information on distributions of various statistical velocity characteristics was obtained mainly for single-phase flows. For two-phase flows, such information is virtually absent due to severe difficulties of their calculation as a result of high sensitivity of higher-order moments (e.g., skewness and excess coefficients) to noise and spikes in

the raw signal, even if the total number of such erroneous measurements referred to as "outliers" is insignificant in overall statistics.

In this research, turbulence structure of a bubbly free jet is analyzed based on distributions of higher-order statistical moments of velocity fluctuations of the liquid flow. To calculate them correctly, the method of vector statistical filtration [1] was applied to ensembles of instantaneous velocity fields obtained separately for each flow regime. The coefficients of skewness  $S_u$  and excess  $E_u$  at different air volume fractions ( $0\% \leq \beta \leq 3\%$ ) were evaluated from the filtered data. Besides, energy spectra of turbulent fluctuations were also calculated for different  $\beta$ . In cross-section  $z/D = 0.5$ , a characteristic peak associated with regular passages of coherent structures in the mixing layer was detected in the single-phase jet at the Strouhal number  $St \approx 2$ . Downstream, this peak broadens and its amplitude noticeably drops. This is due to the loss of coherence of these large-scale vortices. In the two-phase jet, this peak is absent independently of the value of  $\beta$ , which indicates that the coherent structures are suppressed by the dispersed phase.

*The study was performed with funding from the Russian Science Foundation (Project No. 19-79-30075-P).*

## References

1. O. M. Heinz, B. B. Ilyushin, D.M. Markovich, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 25(5), 864–874 (2004).

## OPTICAL FIELD TRANSMISSION IN COMPLEX MEDIUM AND ITS ENCRYPTION APPLICATIONS

R. Xu, M. Feng, J. Yang, X. Sang, Z. Zhao, F. Song

*School of Physics & The Key Laboratory of Weak Light Nonlinear Photonics,  
Nankai University, Ministry of Education P. R. China, Tianjin,  
[xr@mail.nankai.edu.cn](mailto:xr@mail.nankai.edu.cn)*

In this work, the authors research the transmission of optical field in the complex medium and its applications in encryption. Optical field transmission has been widely used in many fields, among which the optical field transmission in the complex medium is very interesting and can achieve many unique functions. The transmission of optical field in the complex medium can realize multidimensional manipulation of optical field, which is promising in the field of encryption. When the optical field passes through a specially designed complex medium, its amplitude and phase change, resulting in a specific pattern. Firstly, the calculation method of optical field transmission in the complex medium is studied. Based on iteration we proposed the non-uniform angular spectrum method [1] for diffraction propagation calculation in the complex medium. By phase pre-processing in the spatial domain and diffraction calculation in the spatial frequency domain, the diffraction propagation problem of the optical field in the complex medium is solved. The advantages of this method in-



clude faster computation and smaller memory requirement. And then, the holographic encryption method based on complex medium is proposed. In this method, the complex refractive index distribution medium is directly used as the secret key. The target image is encrypted into a phase-only computer-generated holograms (CGH), and the CGH is obtained by the improved Gerchberg-Saxton algorithm based on the non-uniform angle spectrum method or random gradient descent algorithm based on non-uniform angular spectrum method. Finally, it can be decrypted by optical holography or digital holography. It is worth noting that the complex medium here can be specially designed to suit the needs. For example, complex medium can be combined with a user's fingerprint or an unclonable fluorescent pattern. The development of additive manufacturing technology and digital holographic technology will greatly promote the further development of this method. Therefore, the encryption method based on complex medium proposed here has broad application prospect and important practical value.

#### References

1. R. Xu, M. Feng, Z. Chen, J. Yang, D. Han, J. Xie, F. Song, *Opt. Lett.*, 47(8), 1972–1975 (2022).

## ADDITIVE MANUFACTURING AND LUMINESCENT PROPERTIES OF RARE EARTH/PHOSPHOR DOPED GLASSES

F. Song, J. Yang

*School of Physics & The Key Laboratory of Weak Light Nonlinear Photonics, Nankai University, Ministry of Education P. R. China, Tianjin*

Multicolor luminescent glasses can be applied in information storage, optical sensing, multicolor laser and information encryption due to its high transparency, tunable photoluminescence emission colors and continuously controlled dopant distribution. Silica glass is a type of special photoelectric glass that is used in optical fiber, lasers, aerospace and other fields, because of its exceptional optical transparency, chemical and heat resistance and long working life under extreme conditions. However, traditional production procedures are known to be challenging to manufacture high-purity and complex-structured silica glasses, which are limited by complicated processing, high manufacturing costs and problematic molding of complex devices.

The new technology of additive manufacturing has been a transformative manufacturing technique with advantages over traditional casting and machining methods, such as the flexibility of complicated geometries, fine structures and short machining cycles. Rare earth/phosphor doped silica glasses are prepared by additive manufacturing technology for the application of illumination and information encryption.

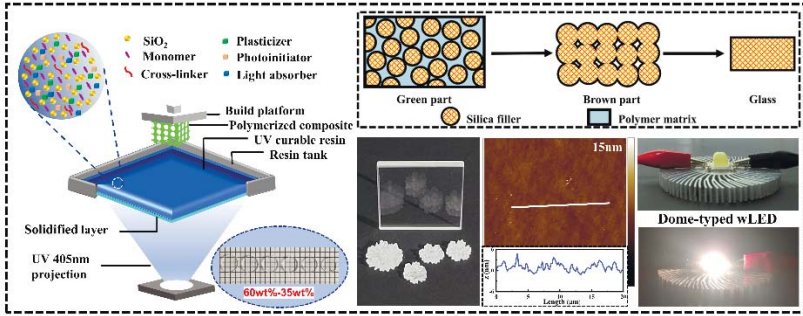


Fig. Additive manufacturing of multicolor luminescent glasses

In general, the nano-sized glass powders as raw materials are dispersed into suitable photocurable monomers to obtain silica printing slurry, and the cured green parts are provided with the characteristics of easy processing like a polymer. Phosphor doped silica glasses are constructed to color-tunable all-inorganic warm white LED by additive manufacturing and pressureless sintering method, which overcomes the problems of low color rendering index and high color temperature due to the lack of red light. The space-selective doping of rare earth ions in silica glass has been realized for information encryption. Additive manufacturing of rare earth/phosphor doped glasses is of great significance to the application of multicolor luminescent glasses.

## MECHANISM ANALYSIS AND EXPERIMENT STUDY ON LASER CLEANING

F. Song, Z. Zhao

*School of Physics & The Key Laboratory of Weak Light Nonlinear Photonics, Nankai University, Ministry of Education P. R. China, Tianjin*

Laser cleaning as an efficient and green new surface cleaning technology has been widely used in rust removal, paint removal, and removal of micro and nano-level pollution particles. So far, contaminants removed by laser cleaning can be divided into two different types, which are fine particles and thin films, respectively. Whether particles or film contaminants, the mechanism of laser cleaning mainly includes ablation, vibration, and shock wave. The ablation mechanism is that the temperature of pollutants reaches a certain degree, which makes the pollutants burn, decompose, melt, and vaporize. The process changes the composition or phase of pollutants. The vibration mechanism is that the cleaning force generated is greater than the binding force between the pollutants and the substrate, when the temperature of pollutants does not reach the ignition point, melting point, and gas point, and there is no phase transition. The pollutants do not undergo a phase transition and still maintain the initial

state after stripping. For the shock wave mechanism, the laser ionizes the air near the pollutant or the pollutant itself, resulting in forming the plasma shock wave. The shock wave propagates to the cleaning object to generate the pushing force, which overcomes the adhesion between the pollutants and the substrate and makes the particles free from the substrate for the purpose of cleaning.

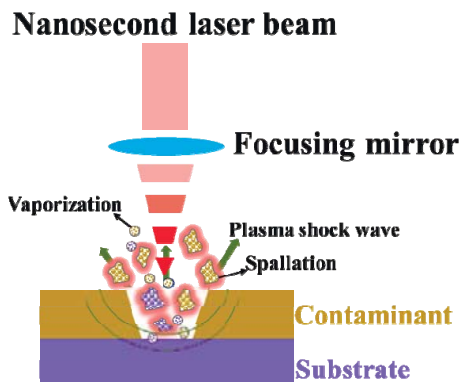


Fig. Schematic of laser cleaning of contaminants on the substrate surface

The finite element method is used to establish a physical model for simulating the processes of laser contaminant interactions. By analyzing the simulation results, the cleaning and damage thresholds are obtained in laser cleaning. Then, we can ensure the cleaning condition, and give optimal laser parameters for experimental study.

## QUANTITATIVE COMPARISON OF TOPICAL LOW-DOSE PHOTODYNAMIC THERAPY USING 5-AMINOLEVULINIC ACID AND METHYLENE BLUE IN DIABETIC WOUND HEALING IN-VIVO USING RAMAN SPECTROSCOPY

H. Zuhayri, A. A. Samarinova, D. A. Lopez Guardado, O. A. Zakharova,  
H. Baalbaki, A. V. Borisov, N. A. Krivova, Yu. V. Kistenev

*Tomsk State University, Russia, Tomsk [zuhayri.n.hala@gmail.com](mailto:zuhayri.n.hala@gmail.com)*

Diabetic wound healing is mainly characterized by a complex mechanism involve at molecular level which is responsible for delayed wound healing [1].

Low-dose photodynamic therapy (LDPDT) is used in dermatology and has been shown to be effective in wound healing and skin rejuvenation [2].

Raman spectroscopy (RS) is a non-invasive and non-destructive method of chemical analysis with a high molecular specificity widely used for medical diagnostics and assessment of biophysical processes [3].

In this study, a comparison between low dose photodynamic therapy with two different photosensitizers, 5-aminolevulinic acid and methylene blue, and two laser doses  $1 \text{ J/cm}^2$  and  $4 \text{ J/cm}^2$  on diabetic wound healing was conducted using Raman spectroscopy in vivo.

The Raman spectra of wound healing process on observation days (1, 3, 7, 14) and healthy skin are presented in Fig. 1. In the Raman spectrum of healthy skin, the peak of amide I band was identified near  $1658 \text{ cm}^{-1}$ , which corresponds to collagen type I. Within the amide III band, two peaks of  $1247 \text{ cm}^{-1}$  and  $1270 \text{ cm}^{-1}$  are associated spectral fingerprints of the collagen. The peak  $1445 \text{ cm}^{-1}$  is dominated by the vibrations of  $\text{CH}_2$  bending, which indicate the total dermal matrix protein content [4].

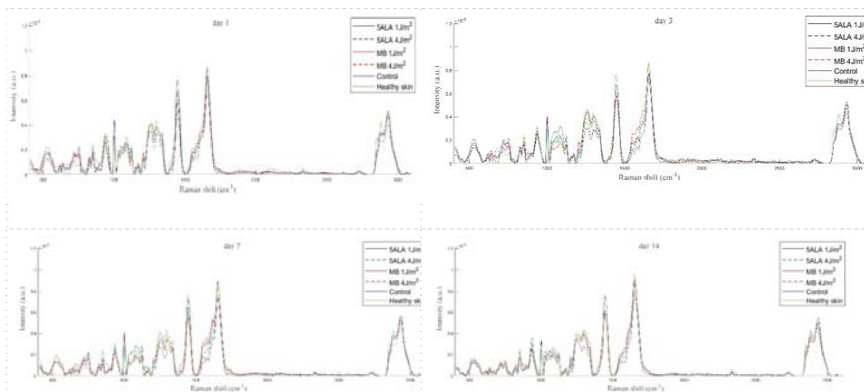


Fig. 1. The mean Raman spectra of skin wounds in all groups on observation days (1,3,7,14) and healthy skin

The  $1658/1445 \text{ cm}^{-1}$  bands areas ratio gives in-formation on collagen content, which is an important factor in wound healing as presented in Fig. 2 [5].

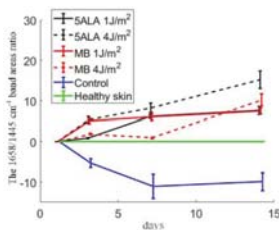


Fig. 2. The  $1658/1445 \text{ cm}^{-1}$  band areas ratio during wound healing

The results indicate the positive effect of the LDPDT in diabetic wounds, where the LDPDT groups had an increased tendency for collagen content compared to the control group, and the SALA  $4 \text{ J/cm}^2$  group showed the best re-

sults. It can be concluded that dose  $4 \text{ J/cm}^2$  is in the effective range of biological response of LDPDT, while  $1 \text{ J/cm}^2$  is close to the lower threshold for diabetic wound LDPDT.

*The research was carried out with the support of a grant under the Decree of the Government of the Russian Federation No. 220 of 09 April 2010 (Agreement No. 075-15-2021-615 of 04 June 2021).*

## References

1. G. Han, R. Ceilley, *Adv Ther.*, 34, 599–610 (2017).
2. A. Tedesco, P. Jesus, “Low Level Energy Photodynamic Therapy for Skin Processes and Regeneration” in: *Photomedicine: Advances in Clinical Practice*. Ed. by Y. Tanaka. Rijeka, Croatia: InTech, 2017. P. 75–94.
3. H.J. Butler, L. Ashton, B. Bird, G. Cinque, K. Curtis, J. Dorney, K. Esmonde-White, N.J. Fullwood, B. Gardner, P.L. Martin-Hirsch, M.J. Walsh, M.R. McAinsh, N. Stone, F.L. Martin, *Nat. Protoc.*, 11, 664–687 (2016).
4. Z. Movasaghi, S. Rehman, I.U. Rehman, *Appl. Spectrosc. Rev.*, 42, 493–541 (2007).
5. H. Zuhayri, A.A. Samarina, A.V. Borisov, D.A.L. Guardado, H. Baalbaki, N.A. Krivova, Y.V. Kistenev, *Pharmaceutics*, 15, 595 (2023).

## НОВЫЕ КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ GaSb/AlP: ФОРМИРОВАНИЕ, СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР

Д. С. Абрамкин, М. О. Петрушков, Д. Б. Богомолов, Е. А. Емельянов,  
М. Ю. Есин, А. В. Васев, А. А. Блошкин, Е. С. Коптев, М. А. Путьто,  
В. В. Атучин, В. В. Преображенский

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Россия, г. Новосибирск, dalamber.07@mail.ru*

Интерес к новым GaSb/AlP квантовым точкам (КТ) обусловлен теоретическими оценками энергии локализации ( $E_{loc}$ ), которая может принимать значение вплоть до  $2,04 \text{ эВ}$  [1]. Такое высокое значение  $E_{loc}$  позволяет ожидать, что время хранения заряда в КТ составит  $\gg 10$  лет [2]. Это делает данные структуры перспективным объектом для создания приборов универсальной памяти, обеспечивающих длительное энергонезависимое хранение информации в сочетании с возможностью быстрого ( $< 10 \text{ нс}$ ) перезаписывания [3]. В докладе представлены результаты экспериментального исследования процессов формирования, структурных свойств и энергетического спектра новых GaSb/AlP КТ.

Гетероструктуры были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на Si(100) подложках. После роста буферных слоёв GaP/Si выращивался  $300 \text{ нм}$  слой AlP. КТ формировались в центре слоя AlP. Рост КТ проходил путём осаждения  $1,6$  монослоёв (МС) GaSb. На поверхности структур были также сформированы КТ для проведения исследований

атомно-силовой микроскопией (АСМ). Для сравнения была выращена структура без КТ. Процесс формирования КТ *in situ* контролировался методом дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО). Анализ геометрии картины брэгговских рефлексов показывает, что упругие деформации в таких КТ практически полностью релаксировали. Сравнение спектров фотолюминесценции (ФЛ) структур с КТ и без позволило выявить полосу ФЛ с максимумом на энергии 0,85 эВ и шириной 60 мэВ, связанную с КТ. Сопоставление данных ФЛ с результатами расчётов энергетического спектра позволило получить оценку значения  $E_{loc} = 1,65–1,70$  эВ. В соответствии с результатами [2], эта оценка позволяет ожидать длительного ( $\gg 10$  лет) хранения заряда в полученных КТ.

*Работа поддержана РФФ, проект № 22-22-20031 и Правительством Новосибирской области, проект № р-14.*

### Литература

1. D.S. Abramkin, V.V. Atuchin, *Nanomaterials*, 12(21), 3794 (2022).
2. T. Nowozin, D. Bimberg, K. Daqrouq, M.N. Ajour, M. Awedh, *J. Nanomater.*, 2013, 59 (2013).
3. A. Marent, T. Nowozin, M. Geller, D. Bimberg, *Semicond. Sci. Technol.*, 26, 014026 (2011).

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ДЛЯ СОЗДАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ПАМЯТИ

Д. С. Абрамкин, И. А. Александров

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,  
Россия, г. Новосибирск, dalamber.07@mail.ru*

Использование самоорганизованных квантовых точек (КТ) в качестве плавающего затвора в ячейках флеш-памяти является многообещающим путём создания универсальной памяти, сочетающей в себе возможности длительного хранения ( $> 10$  лет) и быстрой перезаписи данных ( $< 10$  нс) [1]. В настоящее время максимальное время хранения заряда достигнуто в GaSb/GaP КТ и составляет около 4 дней при энергии локализации ( $E_{loc}$ ) дырки 1,18 эВ [2]. Это делает актуальной задачу поиска и исследования новых КТ с большей  $E_{loc}$ . Предварительные оценки [3] указали на  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$  КТ, в которых можно ожидать высокое значение  $E_{loc}$  для электронов ( $> 2$  эВ). В докладе представлены результаты теоретических расчётов энергетического спектра  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$  с акцентом на определение  $E_{loc}$  электронов.

При расчётах учитывались: зависимость параметров материалов КТ и матрицы от их состава; влияние упругих деформаций на положение энергетических зон; поляризационные эффекты и эффекты размерного квантования. С помощью модели баланса сил [4] были определены критические размеры КТ по отношению к введению прорастающих дислока-

ций. Составы твердых растворов КТ и матрицы  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  и  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$  варьировались в пределах  $0 < x < 1$  и  $0 < y < 0,7$ , поскольку для  $y > 0,7$  получение слоёв  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$  с высокой проводимостью затруднено. В результате определены значения составов  $(x, y)$ , необходимые для того, чтобы  $E_{\text{loc}}$  электронов в КТ с размерами, определенными по модели [4], достигала значений 1,45 эВ и 1,70 эВ, необходимых для хранения заряда в течение 10 лет при 300 К и 350 К, соответственно. Показано, что минимальные упругие деформации при заданной  $E_{\text{loc}} = 1,45$  эВ достигаются для КТ состава  $\text{GaN}/\text{Al}_{0,57}\text{Ga}_{0,43}\text{N}$ , а для  $E_{\text{loc}} = 1,70$  эВ – для КТ состава  $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{N}/\text{Al}_{0,7}\text{Ga}_{0,3}\text{N}$ . Это делает данные КТ оптимальными для приложений универсальной памяти.

*Работа поддержана РФФ, проект № 22-22-20031 и Правительством Новосибирской области, проект № p-14.*

### Литература

1. A. Marent, T. Nowozin, M. Geller, D. Bimberg, *Semicond. Sci. Technol.*, 26, 014026 (2011).
2. L. Bonato, I.F. Arikian, L. Desplanque, C. Coiron, X. Wallart, Y. Wang, P. Ruterana, D. Bimberg, *Phys. Status Solidi B*, 253, 1869 (2016).
3. T. Nowozin, D. Bimberg, K. Daqrouq, M.N. Ajour, M. Awedh, *J. Nanomater.*, 2013, 59 (2013).
4. H. Xie, R. Prioli, A.M. Fischer, F.A. Ponce, R.M.S. Kawabata, L.D. Pinto, R. Jakomin, M.P. Pires, P.L. Souza, *J. Appl. Phys.*, 120, 034301 (2016).

## МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ДОЛИННАЯ СТРУКТУРА ЭКСИТОНА В КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ ИЗ ХАЛЬКОГЕНИДОВ СВИНЦА

И. Д. Авдеев<sup>1</sup>, М. О. Нестоклон<sup>1</sup>, С. В. Гупалов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН  
Россия, г. Санкт-Петербург, [ivan.avdeev@mail.ioffe.ru](mailto:ivan.avdeev@mail.ioffe.ru)

<sup>2</sup>Department of Physics, Jackson State University, Jackson, USA

Квантовые точки из халькогенидов свинца  $\text{PbX}$ ,  $X=\text{S,Se}$  являются перспективными материалами для инфракрасной оптоэлектроники [1]. В них ярко выражены эффекты размерного квантования, а современные экспериментальные методы позволяют исследовать магнитооптические свойства даже одиночных квантовых точек [2; 3]. Основной сложностью их теоретического моделирования является сложная многодолинная зонная структура  $\text{PbX}$ . Экстремумы зон  $\text{PbX}$  расположены в L долинах, состояния из которых могут смешиваться между собой на поверхности квантовых точек, что приводит к снятию долинного вырождения электронных и дырочных состояний и формированию тонкой структуры экситона.

Второй вклад в тонкую структуру экситона вносит обменное кулоновское взаимодействие. Константа обменного взаимодействия в квантовых точках из  $\text{PbX}$  сопоставима с долинными расщеплениями, однако

именно обмен формирует в них сверхъяркий, симметричный по долинным индексам триплет [4], который проявляется в высокотемпературной фотолюминесценции [2] и оптическом поглощении. Характерная структура оптических спектров и формирование тонкой структуры экситона в квантовых точках из PbX показаны на рисунке. Также на рисунке представлен аналитический и атомистический расчет g-факторов сверхъяркого экситонного триплета в квантовых точках из PbS с различной формой поверхности. В работе показано, что в отличие от одночастичных g-факторов [5], экситонные g-факторы гораздо сильнее зависят от формы поверхности квантовых точек, а g-факторы нижних по энергии оптически активных триплетов [3] полностью определяются долинной структурой состояний.

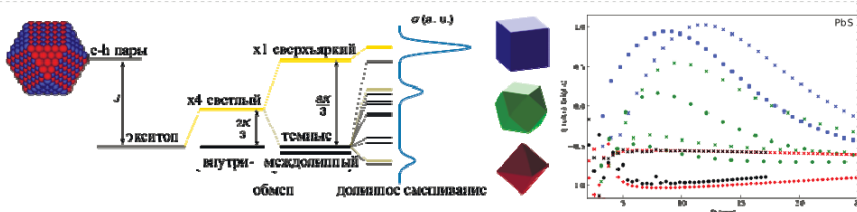


Рис. Схема формирования тонкой структуры экситона в КТ из PbX, типичная структура оптического спектра и расчет g-факторов сверхъяркого экситонного триплета в квантовых точках из PbS с различной формой поверхности (куб, кубоктаэдр, октаэдр, сфера)

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-00121.*

### Литература

1. L. Gao, L.N. Quan, F. Pelayo García de Arquer, et al., *Nat. Photonics*, 14(4), 227–233 (2020).
2. Z. Hu, Y. Kim, S. Krishnamurthy, I.D. Avdeev, M.O. Nestoklon, A. Singh, A.V. Malko, S.V. Goupalov, J.A. Hollingsworth, H. Htoon, *Nano Lett.*, 19(12), 8519–8525 (2019).
3. Y. Kim, Z. Hu, I.D. Avdeev, A. Singh, V. Chandrasekaran, M.O. Nestoklon, S.V. Goupalov, J.A. Hollingsworth, H. Htoon, *Small*, 17(13), 2006977 (2021).
4. I.D. Avdeev, M.O. Nestoklon, S.V. Goupalov, *Nano Lett.*, 20(12), 8897–8902 (2020).
5. I.D. Avdeev, S.V. Goupalov, M.O. Nestoklon, *Phys. Rev. B*, 107, 035414 (2023).



## СТРУКТУРА ТОНКИХ ГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ ЖИДКОСТИ ВБЛИЗИ ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Ю. В. Аграфонов, И. С. Петрушин, Д. В. Халаимов,  
И. В. Безлер

*Иркутский государственный университет  
Россия, г. Иркутск, agrafonov@physdep.isu.ru*

Изучение ближнего порядка в жидкостях вблизи твердой ограничивающей поверхности является важной задачей статистической физики сильно взаимодействующих частиц. Ближний порядок описывается совместным решением системы двух интегральных уравнений для одно- и двухчастичной функцией распределения [1], что требует больших вычислительных ресурсов. Поэтому обычно ограничиваются решением уравнения для одночастичной функции распределения.

В работе [2] было показано, что при некоторых разумных допущениях, уравнение для одночастичной функции распределения  $f(z_1)$  сводится к линейному интегральному уравнению Фредгольма второго рода, где  $z_1$  – удаление частицы от поверхности. Ядро и правая часть уравнения определяются граничным условием перехода к однородной жидкости вдали от поверхности. Параметром уравнения является приведённая концентрация  $n = \frac{N}{V} \sigma^3$ , где  $\sigma$  – характерный размер частицы.

Мы рассматриваем решение данного уравнения для молекулярной системы твердых сфер вблизи твердой поверхности. Граничным условием станет приближение Перкуса – Йевики для однородной жидкости, которое допускает аналитическое решение. Тем самым уравнение для функции  $f(z_1)$  также допускает аналитическое решение для всех концентраций  $0 \leq n \leq 1$ , соответствующих агрегатным состояниям вещества от идеального газа до плотной жидкости. Решение носит осциллирующий характер и экспоненциально затухает при удалении от поверхности. Вычислены локальная плотность в приповерхностном слое и адсорбция в сравнении с известными данными [3].

### Литература

1. G.A. Martinov. *Fundamental theory of liquids; method of distribution functions*. Bristol : Adam Hilger, 1992. 470 p.
2. Yu. Agrafonov, I. Petrushin, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1847, 012035 (2021).
3. D.A. Tikhonov, O.E. Kiselyov, G.A. Martynov, G.N. Sarkisov, *J. Mol. Liq.*, 82(1-2), 3–17 (1999).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СПЕКТРА ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ ЧИРПИРОВАННОГО ФЕМТОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСА ИЗЛУЧЕНИЯ

С. В. Алексеев<sup>1</sup>, В. Ф. Лосев<sup>1</sup>, В. И. Трунов<sup>2</sup>, С. А. Фролов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт сильноточной электроники, Россия, г. Томск, alexseev10100@gmail.com*

<sup>2</sup>*Институт лазерной физики СО РАН, Россия, г. Новосибирск*

В работе приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований особенностей формирования спектра второй гармоники (ВГ) чирпированного фемтосекундного импульса излучения с длиной волны 945 нм и длительностью (50–60) фс в нелинейно-оптических кристаллах KDP. Показано экспериментально и подтверждено результатами теоретического моделирования, что наличие чирпа в преобразуемом излучении может приводить к уширению спектра ВГ. Обнаружено, что существует оптимальная величина чирпа, при которой достигается максимальное уширение спектра ВГ. Проанализировано влияние интенсивности основного чирпированного излучения на величину этого уширения.

Экспериментально показано, что в случае отрицательно чирпированного импульса накачки спектральная ширина ВГ увеличивается в 1,5 раза, а в случае положительного – в 2 раза. Компрессия импульса излучения с уширенным спектром позволяет сокращать длительность импульса второй гармоники примерно пропорционально уширению спектра. Получена минимальная длительность импульса излучения ВГ 35 фс, что в 2 раза короче длительности импульса излучения основной гармоники.

Обсуждается вклад различных физических механизмов в уширение спектра второй гармоники и сокращение ее длительности импульса.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке в рамках проекта FWGU-2021-0005 Минобрнауки РФ и гранта РФФ № 23-22-00023.*

## ДИАГНОСТИКА ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ШИРОКОЗОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПРИ ПОМОЩИ ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ДОЗИМЕТРИИ

Б. П. Адуев<sup>1</sup>, Н. Л. Алукер<sup>1</sup>, А. С. Артамонов<sup>2</sup>, Д. С. Нурмухамедов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты СО РАН  
Россия, г. Кемерово, [naluker@gmail.com](mailto:naluker@gmail.com)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, г. Москва, [asartamonov1@mephi.ru](mailto:asartamonov1@mephi.ru)

Исследование механизмов взаимодействия лазерного излучения с широкозонными материалами продиктовано необходимостью выяснения фундаментальных вопросов и решения ряда прикладных задач – создания оптических материалов, пригодных для применения в мощных лазерных системах, развития методов лазерной искровой спектроскопии, разработки лазерных технологий получения новых функциональных нано размерных структур и т.д.

В работе проведено исследование эмиссионных спектров широко зонных материалов SiO<sub>2</sub> (аморфный), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (монокристаллический) и AlN (керамика) методом LIBS при воздействии импульса неодимового лазера на основной гармонике 1,064 мкм, длительности импульса 14 нс, поверхностной плотности энергии в импульсе 13 Дж/см<sup>2</sup>, диаметре пятна на облучаемой поверхности ~ 2 мм.

Для обработки данных было использовано приложение LIBS в атомной базе данных NIST позволяющее моделировать спектры при типичных физических условиях лазерно-индуцированного пробоя плазмы и сравнить эти графики с экспериментальными спектрами.

Интерес к исследованию данных материалов обусловлен тем, что они используются в термолюминесцентной дозиметрии как термолюминесцентные детекторы и применяются для оценки поглощенной дозы ионизирующего излучения (ИИ) и ультрафиолета (УФ), следовательно, после их исследования методом LIBS можно оценить дозу, которая поглотилась детектором в процессе исследования. Детекторы ТЛД-К (SiO<sub>2</sub>) не чувствительны к свету и с их помощью определяется доза ионизирующего воздействия. Детекторы откалиброваны по ИИ, и по ним определены градуировочные коэффициенты для детекторов ТЛД-500 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и AlN. Детекторы ТЛД-500 и AlN обладают наряду с чувствительностью к ионизирующему излучению обладают сильной чувствительностью к световому воздействию, причем чувствительность AlN к УФ в 10 раз превосходит его чувствительность к ИИ. Применение разных типов детекторов позволило оценить вклады преобразования энергии лазера в ионизирующее излучение, УФ и нагрев.

## РЕНТГЕНОФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ КЕРАМИКИ YAG:Ce, СИНТЕЗИРОВАННОЙ РАДИАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Н. В. Амбарникова<sup>1,2</sup>, Е. Ф. Полисадова<sup>1</sup>  
В. М. Лисицын<sup>1</sup>, Е. В. Домаров<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, [elp@tpu.ru](mailto:elp@tpu.ru)

<sup>2</sup>АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов»,  
Россия, г. Томск, [nva18@tpu.ru](mailto:nva18@tpu.ru)

<sup>3</sup>Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Россия, г. Новосибирск,  
[inp@inp.nsk.su](mailto:inp@inp.nsk.su)

Материалы на основе YAG:Ce нашли широкое применение в качестве люминофоров, сцинтилляторов [1]. Метод синтеза YAG:Ce керамики в поле мощных потоков радиации, описанный в работе [2], имеет преимущества в виде высокой скорости синтеза, простота введения различных активаторов и оперативного варьирования состава, и позволяет получать образцы, сопоставимые по излучательным характеристикам с материалами на основе YAG, синтезированных другими методами. При этом, в зависимости условий синтеза может меняться структура керамики, состав дефектов и излучающих центров, что влияет на спектр свечения, квантовый и световой выход, колориметрические характеристики.

Целью данной работы является исследование структуры YAG:Ce керамики с содержанием церия от 0,2 до 1 вес. %  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  в шихте и выявление корреляции особенностей фазового состава с люминесцентными свойствами образцов. Для исследований использовались образцы, синтезированные радиационным методом – путем воздействия высокоэнергетического электронного пучка. Исследование фазового состава были проведены с помощью рентгеновского дифрактометра XRD-7000 Shimadzu. Для возбуждения люминесценции использовался «синий» чип на основе GaN-кристалла с пиковой длиной волны 451 нм. Спектры свечения измерялись с использованием спектрорадиомета CS-2000A, входящего в состав лабораторного оборудования АО «НИИПП».

По результатам рентгенофазового анализа было установлено, что образцы состоят преимущественно из кубического иттрий-алюминиевого граната, содержание фазы  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  в образцах лежит в диапазоне от 84 до 96,6 об. %. Помимо пиков основной фазы на рентгенограммах обнаружены пики характерные для  $\text{YAlO}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  и оксидных соединений церия (на уровне фона). На рисунке представлены XRD-диаграммы и спектры люминесценции образцов.

В таблице представлены основные характеристики люминесцентной керамики YAG:Ce. С увеличением концентрации церия доля фазы YAG в составе керамики растёт, при этом эффективность свечения максимальная

для образца с содержанием оксида церия 0,5 %. Наблюдается незначительное смещение максимума спектра с изменением фазового состава и концентрации активатора. Наблюдается изменение параметра решетки в пределах 12,012–12,015 Å.

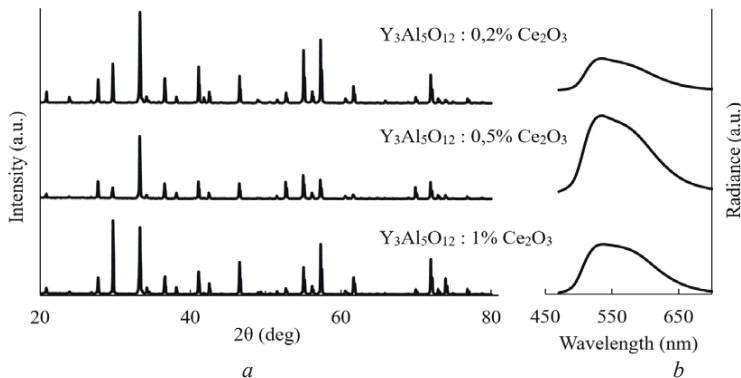


Рис. XRD-диаграммы (a) и спектры люминесценции (b)

Таблица

Результаты исследований

Образец	Содержание фаз, об. %			Параметр решетки YAG, Å	$L_e$ , яркость Вт/ср м3	$\lambda_{\text{шик}}$ , нм
	YAG	YAlO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (корунд)			
Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> : 0,2 % Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	84,0	16,0	0	12,015	29,9	537
Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> : 0,5 % Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	88,6	11,4	0	12,013	42,7	535
Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> : 1 % Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	96,6	2,2	1,22	12,012	16,9	535

Таким образом, показано, что при изменении содержания Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> изменяется структура керамики и спектральные характеристики, обнаружено присутствие фазы ортоалюмината иттрия в YAlO<sub>3</sub>.

XRD-анализ выполнен при использовании оборудования ЦКП НОИЦ НМНТ ТПУ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-73-00108, <https://rscf.ru/project/23-73-00108/>.

### Литература

1. Z. Xia, A. Meijerink, *Chem. Soc. Rev.*, 46, 275–299 (2017).
2. V.M. Lisitsyn, A.T. Tulegenova, E.V. Kaneva, D.A. Musakhanov, B.P. Gritsenko, *Materials*, 16(3), 1057 (2023).

## РЕНТГЕНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КРИСТАЛЛОВ ГИБРИДНОГО ПЕРОВСКИТА $\text{MAPbBr}_3$

В. Е. Аникеева<sup>1,2</sup>, К. Н. Болдырев<sup>1</sup>, О. И. Семенова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Институт спектроскопии РАН, Россия, г. Троицк, [anikeeva.ve@phystech.edu](mailto:anikeeva.ve@phystech.edu)*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский университет*

*«Высшая школа экономики», Россия, г. Москва*

<sup>3</sup>*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,  
Россия, г. Новосибирск*

Применение монокристаллов гибридного перовскита метиламмония бромид свинца ( $\text{MAPbBr}_3$ ) в высокочувствительных детекторах рентгеновского и  $\gamma$ -излучения обусловлено высокой тормозной способностью (из-за наличия атомов свинца) в сочетании с низкой плотностью ловушек, высокой эффективностью накопления заряда, малой плотностью темнового тока и высоким значением объемного сопротивления [1; 2]. Несмотря на большой интерес к гибридным металлорганическим перовскитам как детекторам рентгеновского излучения, влияние электромагнитных волн рентгеновского диапазона на их оптоэлектронные свойства до конца не изучено.

В данной работе представлены результаты спектроскопического исследования рентгенолюминесценции и фотолюминесценции монокристалла  $\text{MAPbBr}_3$  в широком температурном диапазоне (7–300 К). При охлаждении образца до  $T = 7$  К наблюдались два пика в спектре фотолюминесценции (синяя кривая на рис.): пик экситона типа Ванье-Мотта с энергией  $E \approx 2,25$  эВ, который согласуется с ранее приведенными в литературе данными [3], и пик с энергией  $E \approx 2,36$  эВ, соответствующий фундаментальному поглощению в  $\text{MAPbBr}_3$  [4]. В спектре рентгенолюминесценции (красная кривая на рис. 1) при этой же температуре наблюдался достаточно широкий несимметричный пик с максимумом на энергии  $E \approx 2,16$  эВ и небольшим перегибом на «плече» спектра вблизи края зоны фундаментального поглощения. Ранее было показано, что воздействие рентгеновского излучения на кристаллы  $\text{MAPbBr}_3$  вызывает образование вакансий брома, что влияет на взаимодействие между фотоиндуцированными зарядами и оптическими фонами решётки, – создаются поляроны большого радиуса [5]. Наблюдаемые особенности в спектре рентгенолюминесценции предположительно связаны с образованием вышеупомянутых поляронов, так как появление бромных вакансий, вызванное рентгеновским облучением, изменяет дипольный момент в кристалле, и, таким образом, может повлиять на способность ионов экранировать кулоновские взаимодействия электронно-дырочных пар [6].

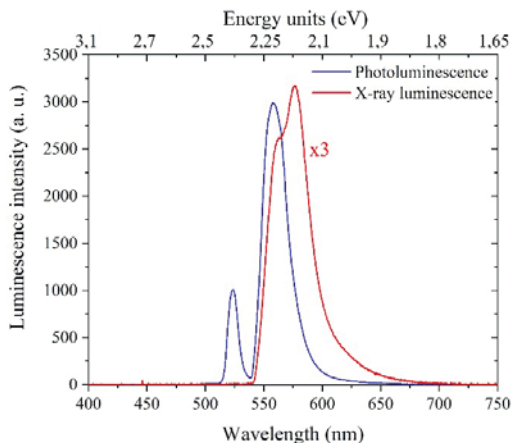


Рис. Спектры фотолюминесценции (синяя кривая) и рентгенолюминесценции (красная кривая) монокристалла MAPbBr<sub>3</sub> при температуре 7 К.

*Работа выполнена при поддержке проекта РНФ (№ 19-72-10132-П). В. Е. Аникеева и К. Н. Болдырев входят в состав ведущей научной школы РФ «Опико-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (проект НШ-776.2022.1.2).*

### Литература

1. H. Wei, Y. Fang, P. Mulligan, W. Chuirazzi, H.H. Fang, C. Wang, B.R. Ecker, Y. Gao, M.A. Loi, L. Cao, J. Huang, *Nat. Photonics*, 10, 333–339 (2016).
2. W. Wei, Y. Zhang, Q. Xu, H. Wei, Y. Fang, Q. Wang, Y. Deng, T. Li, A. Gruverman, L. Cao, J. Huang, *Nat. Photonics*, 11, 315–321 (2017).
3. D. Marongiu, M. Saba, F. Quochi, A. Mura, G. Bongiovanni, *J. Mater. Chem. C*, 7(39), 12006–12018 (2019).
4. H. Diab, C. Arnold, F. Lédée, G. Trippé-Allard, G. Delport, C. Vilar, F. Bretenaker, J. Barjon, J.S. Lauret, E. Deleporte, D. Garrot, *J. Phys. Chem. Lett.*, 8(13), 2977–2983 (2017).
5. G. Armadori, L. Ferlauto, F. Lédée, M. Lini, A. Ciavatti, A. Kovtun, F. Borgatti, G. Calabrese, S. Milita, B. Fraboni, D. Cavalcoli, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 13(49), 58301–58308 (2021).
6. I. Anusca, S. Balčiūnas, P. Gemeiner, Š. Svirskas, M. Sanlialp, G. Lackner, C. Fettkenhauer, J. Belovickis, V. Samulionis, M. Ivanov, B. Dkhil, J. Banys, V.V. Shvartsman, D.C. Lupascu, *Adv. Energy Mater.*, 7(19), 1700600 (2017).

## ЭФФЕКТ ТАЛЬБОТА ПРИ СЕЛЕКТИВНОМ ОТРАЖЕНИИ ОТ ИНДУЦИРОВАННОЙ РАМАНОВСКОЙ РЕШЕТКИ

В. Г. Архипкин, С. А. Мысливец

*Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН – обособленное подразделение  
ФИЦ КНЦ СО РАН, Россия, г. Красноярск, [avg@iph.krasn.ru](mailto:avg@iph.krasn.ru)  
Институт инженерной физики и радиоэлектроники,  
Сибирский федеральный университет, Россия, г. Красноярск*

При прохождении плоской монохроматической световой волны через периодическую решетку (структуру) может наблюдаться эффект Тальбота (ЭТ), который заключается в периодическом самовоспроизведении изображения решетки на расстояниях кратных длине Тальбота [1; 2]. Это явление является следствием интерференции между порядками дифракции в ближней зоне (дифракция Френеля). ЭТ имеет обширные и многогранные применения в различных областях [2]: интерферометрии [3], оптической визуализации и вычислительной технике [4], оптической микроскопии [5], литографии [6] и др.

В лекции рассматривается эффект Тальбота при селективном отражении пробного излучения на границе раздела диэлектрика и слоя трехуровневых атомов, в котором наводится рамановская решетка [7], когда пробное поле взаимодействует со стоячей волной накачки, направленной параллельно границе раздела. В таких условиях граница раздела может работать как отражательная дифракционная решетка. Рассмотрены случаи одномерной и двумерной решетки. Показано, что в ближней зоне могут возникать дифракционные паттерны, подобные изображению Тальбота. Пространственная структура дифракционных паттернов существенно зависит от интенсивности поля накачки и рамановской отстройки. Обсуждаются особенности эффекта Тальбота при различных отстройках и интенсивностях поля накачки, а также периодах стоячей волны накачки. Показано, что коэффициент отражения селективно отраженной волны может быть, как больше, так и меньше обычного френелевского коэффициента отражения.

Полученные результаты могут найти применения при исследовании взаимодействия атомов с поверхностью, а также в обработке оптической информации.

### Литература

1. K. Patorski. The self-imaging phenomenon and its applications. *Progress in Optics*. Ed. by E. Wolf. New York: North-Holland, 1989. Vol. 27, pp. 1–108.
2. J. Wen, Y. Zhang, M. Xiao, *Adv. Opt. Photonics*, 5(1), 83–130 (2013).
3. J.C. Bhattacharya, *Appl. Opt.*, 40(10), 1658–1662 (2001).
4. J. Garcia-Sucerquia, D.C. Alvarez-Palacio, H.J. Kreuzer, *Appl. Opt.*, 47, 4723–4728 (2008).
5. S. Feng, M. Wang, J. Wu, *Opt. Lett.*, 41(14), 3157–3160 (2016).
6. Q. Wu, H. Xia, H. Jia, H. Wang, C. Jiang, L. Wang, J. Zhao, R. Tai, S. Xiao, D. Zhang, S. Yang, J. Jiang, *Opt. Lett.*, 44(4), 1031–1034 (2019).
7. V.G. Arkhipkin, S.A. Myslivets, *Phys. Rev. A*, 100, 063835 (2019).



## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ СНЯТИЯ САМООГРАНИЧЕННОСТИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ПЕРЕХОДА ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ В ИОНЕ $\text{Er}^{3+}$ ДЛЯ КРИСТАЛЛОВ $\text{BaY}_{1.8}\text{Lu}_{0.2}\text{F}_8$

А. В. Астраханцева<sup>1</sup>, А. А. Шавельев<sup>1</sup>, С. В. Кузнецов<sup>2</sup>, А. Г. Николаев<sup>3</sup>  
К. Н. Болдырев<sup>4</sup>, А. С. Низамутдинов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики,  
Россия, г. Казань, [anya4324@gmail.com](mailto:anya4324@gmail.com)

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Россия, г. Москва

<sup>3</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт геологии  
и нефтегазовых технологий, Россия, г. Казань

<sup>4</sup>Институт спектроскопии РАН, Россия, г. Москва, г. Троицк

Лазеры, излучающие в инфракрасном диапазоне спектра, являются основой для создания лазерных газоанализаторов, используемых в дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии для определения концентрации парниковых газов и водяных паров. Линии поглощения углекислого газа и воды находятся на длинах волн около 1,5 и 2,7 мкм, что соответствует длинам волн лазерной генерации эрбия [1; 2].

Генерация лазерного излучения на длине волны около 2,7 мкм в матрицах, легированных ионами  $\text{Er}^{3+}$ , реализуется между состояниями двух возбужденных термов  ${}^4I_{13/2}$  и  ${}^4I_{11/2}$ . Для большинства твердотельных лазерных сред время жизни верхнего лазерного состояния является меньше времени жизни нижнего, такие переходы называются самоограниченными. Явления кросс-релаксации и ап-конверсии при больших концентрациях активной примеси помогают снять условие самоограниченности [3; 4].

В настоящей работе были исследованы спектрально-кинетические характеристики в ИК области спектра кристаллов  $\text{BaY}_{1.8}\text{Lu}_{0.2}\text{F}_8$ , активированных ионами  $\text{Er}^{3+}$  с концентрациями 20,0 и 30,0 ат.%. Показано, что для кристаллов  $\text{BaY}_{1.8}\text{Lu}_{0.2}\text{F}_8:\text{Er}$  характерно уширение диапазона усиления для полосы около 2,7 мкм по сравнению с кристаллами YLF:Er.

Для серии образцов кристаллов  $\text{BaY}_{1.8}\text{Lu}_{0.2}\text{F}_8$  с различной концентрацией ионов  $\text{Er}^{3+}$  определено время жизни состояний  ${}^4I_{11/2}$  и  ${}^4I_{13/2}$ . Показано, что при высоких концентрациях ионов  $\text{Er}^{3+}$  (20,0 и 30,0 ат.%) время жизни верхнего лазерного уровня  ${}^4I_{11/2}$  становится больше времени жизни нижнего лазерного уровня  ${}^4I_{13/2}$ , что говорит о возможной эффективной лазерной генерации в непрерывном режиме на длине волны около 2,7 мкм.

*Работа проведена за счет субсидии FZSM-2022-0021, выделенной Казанскому федеральному университету на выполнение государственно-го задания в сфере научной деятельности.*

## Литература

1. K.N. Gorbachenya, A.S. Yasukevich, V.E. Kisel et.al, *Crystals*, 12(4), 519 (2022).
2. K.N. Gorbachenya, S.V. Kurilchik, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, N.V. Kuleshov, A.S. Nizamutdinov, S.L. Korableva, V.V. Semashko, *Quantum Electron.*, 46(2), 95–99 (2016).
3. F. Auzel, “Up-conversions in RE-doped Solids,” in: *Spectroscopic Properties of Rare Earths in Optical Materials*. Ed. by R. Hull, J. Parisi, R.M. Osgood, H. Warlimont, G. Liu, B. Jacquier. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. pp. 266–319.
4. A.M. Tkachuk, I.A. Mironov, V.M. Reiterov, G.E. Novikov, O.A. Orlov, H.J. Pohl, R.W. Steiner, M. Edelmann, V. P. Gapontsev, *Proc. SPIE*, 4350, 81–89 (2001).

## СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПЛЕКСОВ ДИПИРРОМЕТЕНОВ С d-МЕТАЛЛАМИ

М. В. Ашмарина, Ю. В. Аксенова

*Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Россия, г. Томск, [mariaashmarina6@gmail.com](mailto:mariaashmarina6@gmail.com)*

На сегодняшний день активно развивается направление фотоники, связанное с созданием новых оптических материалов и устройств на основе сложных органических молекул. Особый интерес представляют комплексы дипиррометенов. Наиболее известными представителями являются комплексы дипиррометенов с дифторборатом (BODIPY). Известно, что BODIPY обладают высокой хромофорной активностью в видимой области электромагнитного спектра и хорошей фотостабильностью. По сравнению с комплексами BODIPY, комплексы дипиррометенов с d-металлами имеют высокую чувствительность спектрально-люминесцентных характеристик к составу и положению лигандов, металлу-комплексообразователю и к параметрам окружающей среды. С целью практического использования в различных сферах биологии и медицины, важно исследовать данные комплексы и находить наиболее перспективные из них.

В качестве объектов исследования были выбраны комплексы дипиррометенов цинка и кадмия с заместителями различного строения (Br, I, различные алкильные группы). Проведена регистрация спектров поглощения, флуоресценции и возбуждения флуоресценции данных комплексов при нормальных условиях, а также спектров фосфоресценции, возбуждения фосфоресценции и времен жизни триплетных состояний при заморозке жидким азотом до 77 К.

Показано, что особенности строения комплексов и окружающей среды качественно не влияют на спектры поглощения и люминесценции, но значительно влияют на спектрально-люминесцентные характеристики. Для данных комплексов характерны низкие квантовые выходы флуоресценции и высокая эффективность фосфоресценции. Результаты служат

основанием для дальнейших исследований данных комплексов в качестве оптических сенсоров на кислород и фотосенсибилизаторов для генерации синглетного кислорода.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030) (НИР № НУ 2.0.7.22 МЛ).*

## КИНЕТИКА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА $\text{Li}_2\text{O-K}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ СТЕКЛОКЕРАМИКИ С ХРОМОМ

А. Н. Бабкина, К. С. Зырянова, В. Г. Шеремет,  
Е. В. Кульпина, Н. К. Кузьменко

*Национальный исследовательский университет ИТМО  
Россия, г. Санкт-Петербург, [babkina.anastasya@bk.ru](mailto:babkina.anastasya@bk.ru)*

В работе было исследовано влияние концентрации окиси лития на кинетику кристаллизации и спектральные свойства щелочно-алюмооборатной стеклокерамики, активированной ионами хрома. Была синтезирована серия стекол системы  $(100-x) \cdot (22,7 \text{ K}_2\text{O} - 22,7 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 45,4 \text{ B}_2\text{O}_3 - 0,3 \text{ Sb}_2\text{O}_3 - 0,05 \text{ Cr}_2\text{O}_3 - 8,8 \text{ F}) - x \text{ Li}_2\text{O}$ , где  $x = 0; 2,3; 4,5; 6,8; 9,1; 11,5; 13,8; 16,1; 18,4$  мол.%. Стекло было синтезировано при температуре  $1340^\circ\text{C}$  в течение 1 ч с перемешиванием расплава платиново-родиевой мешалкой. Синтез стеклокерамики производился в два этапа: первый этап при температуре  $450^\circ\text{C}$  в течение 10 ч, второй этап при температуре  $600^\circ\text{C}$  в течение 1 ч.

Кинетика кристаллизации стекол была исследована методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Температура стеклования составов лежит в области  $420\text{--}470^\circ\text{C}$ . В области  $600\text{--}700^\circ\text{C}$  наблюдаются экзотермические реакции. Для большинства составов в интервале температур экзотермических реакций протекают три параллельных процесса: двумерная нуклеация по Авраами – Ерофееву, а также двумерная и трехмерная кристаллизация с минимальной энергией активации порядка  $150\text{--}200$  кДж/моль. В процессе термообработки в матрице стекла выделяется кристаллическая фаза  $\text{LiAl}_7\text{B}_4\text{O}_{17}$ . Доля образовавшейся кристаллической фазы для образцов с содержанием лития менее 6,8 мол. % равна нулю, а для стекол при увеличении содержания  $\text{Li}_2\text{O}$  от 6,8 до 18,4 мол. % кристалличность материала увеличивается от 27 до 69 %. По спектрам поглощения стеклокерамики рассчитана напряженность кристаллического поля  $Dq/B$ , значение которой возрастает от 2,25, что соответствует стеклу, до 3,55 с увеличением содержания  $\text{Li}_2\text{O}$ , что соответствует ионам  $\text{Cr}^{3+}$  в сильном кристаллическом поле. Спектры люминесценции имеют три полосы с максимумами при 685, 700 и 715 нм. Кинетика затухания люминесценции описывается суммой двух экспонент с временами затухания

0,5–0,7 и 5–8 мс. Квантовый выход люминесценции стеклокерамики увеличивается вместе с содержанием  $\text{Li}_2\text{O}$  до 50 % при 16,1 мол. %  $\text{Li}_2\text{O}$ . Таким образом, щелочно-алюмооборатная стеклокерамика, легированная хромом, является перспективным материалом для создания источников излучения в красной и ближней ИК областях спектра.

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ НАЗЕМНОГО ПРИЕМНОГО ТЕРМИНАЛА ДЛЯ КВАНТОВОЙ СВЯЗИ

К. А. Барбышев<sup>1,2</sup>, А. В. Дуплинский<sup>1,3</sup>, А. В. Хмелев<sup>1</sup>,  
В. Л. Курочкин<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>ООО «КусПэйс Технологии», Россия, г. Москва

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
Россия, г. Москва, [barbyshevka@mpei.ru](mailto:barbyshevka@mpei.ru)

<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
Россия, г. Москва

<sup>4</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»  
Россия, г. Москва

Актуальной научно-технической задачей современности является развитие технологий квантового распределения ключей (КРК) для обеспечения безопасной передачи и хранения данных. Существующие оптоволоконные схемы КРК способны эффективно передавать квантовый сигнал лишь на несколько сотен километров, из-за наличия потерь в среде. В результате для увеличения дальности действия квантово-криптографических систем была предложена концепция спутниковой связи между двумя наземными станциями с использованием промежуточного доверенного узла – спутника [1].

В настоящей работе кратко изложены результаты теоретических оценок ключевых параметров для квантового канала связи между спутником Мисис и наземным приемным терминалом, базирующимся на астрономическом телескопе с апертурой 300 мм. Полученные значения варьируются в зависимости от погодных условий следующим образом: уровень потерь в линии – 31–49 дБ, скорость генерации просеянного ключа – 0,3–15 кбит/с, длина просеянного ключа – 830–2000 кбит, длина секретного ключа – 36–456 кбит, коэффициент квантовых битовых ошибок – 1,2–10,7 %.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (Стратегический проект «Квантовый Интернет»).*

### Литература

1. S.K. Liao, W.Q. Cai, W.Y. Liu et al., *Nature*, 549(7670), 43–47 (2017).

## МАЛОИНЕРЦИОННЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В КРИСТАЛЛАХ ВОЗБУЖДАЕМЫХ ПЛОТНЫМИ ФЕМОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ И ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ

В. И. Барышников

*Иркутский государственный университет путей сообщения  
Россия, г. Иркутск, [yibh@rambler.ru](mailto:yibh@rambler.ru)*

Многофотонное фемтосекундное лазерное возбуждение собственного вещества кристаллов в интервале десятков фемтосекунд сопровождается эффективным заселением электронами плотности состояний зонной структуры и затем в когерентном режиме миграцией зонных электронов и дырок без их разогрева. Такой же процесс происходит при возбуждении кристаллического вещества сильноточными пикосекундными (10 пс) пучками электронов. Исследования процессов нелинейного взаимодействия интенсивного фемтосекундного лазерного излучения и плотных ультракоротких электронных пучков с кристаллическими средами позволяют углубить фундаментальные основы высокоэнергетической электроники твердого тела и на этой основе успешно разрабатывать новые лазерные и радиационные технологии.

Исследованы спектральные особенности малоинерционной широкополосной  $2pO^{2-}$  валентной фотолюминесценции (ФЛ) и катодолуминесценции (КЛ) в кислород содержащих кристаллах. ФЛ возбуждается фемтосекундными лазерными импульсами ( $2\omega:Ti:Sp$ ; 360–390 нм; 1–15 МВт/см<sup>2</sup>; 80 МГц; 50 фс) в режиме трехфотонной ионизации, КЛ пикосекундными электронными пучками (280 кэВ; 0,5–1,0 кА/см<sup>2</sup>; 10 пс) с допороговой энергией ударного смещения ионов  $O^{2-}$ .

В ходе фемтосекундного многофотонного лазерного и сильноточного пикосекундного электронного возбуждения кристаллов задается близкая по величине, концентрация зонных носителей заряда [1]. Однако лазерный импульс имеет пространственную протяженность 5 мкм с неизменным спектром полосы ФЛ, а электронный пучок 250 мкм с широкополосной КЛ, спектральная ширина которой приближается к спектру ФЛ с глубиной пробега электронов. Это связано с потерей ударного импульса электронов при торможении, падением напряженности ( $E$ ) в окрестности ударно смещенных регулярных ионов  $O^{2-}$ . И, как следствие, имеет место снижение уширения  $2pO^{2-}$  валентной зоны, где происходят излучательные переходы электронов.

### Литература

1. В.И. Барышников, О.В. Горева, Ю.А. Григорьева, О.Л. Никонович, *Опт. и спектр.*, 126(3), 336–341 (2019).

## ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОГО И РАДИАЦИОННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В КРИСТАЛЛАХ $\text{Ce:Y}_2\text{SiO}_5$

В. И. Барышников, Ю. А. Мурзина

*Иркутский государственный университет путей сообщения,  
Россия, г. Иркутск, [vibh@rambler.ru](mailto:vibh@rambler.ru)*

Мощное радиационное и лазерное облучение кристаллов  $\text{Ce:Y}_2\text{SiO}_5$  сопровождается интенсивным наносекундным свечением примесных ионов  $\text{Ce}^{3+}$ . Указанные примесные ионы являются рабочими центрами УФ лазеров и кристаллических наносекундных преобразователей рентгеновского изображения в микродозовой диагностике.

Исследованы особенности возбуждения наносекундной (50–90 нс) широкополосной люминесценции ( $5d^1-4f$  переходы, 380–480 нм) в кристаллах  $\text{Ce:Y}_2\text{SiO}_5$  наносекундными лазерными импульсами (3 $\omega$ :Nd:YAG; 353 нм; 5 нс), пикосекундным рентгеновским излучением (280 кэВ; 10 пс) и пикосекундными высокоэнергетическими электронными пучками (280 кэВ; 1,0 кА/см<sup>2</sup>; 10 пс).

Установлено, что катодолюминесценция (КЛ) и рентгенолюминесценция (РЛ) ионов  $\text{Ce}^{3+}$  в  $\text{Y}_2\text{SiO}_5$  при 300 К не зависит от плотности возбуждения имеют время затухания 90 нс, при том, что затухание ФЛ  $\text{Ce}^{3+}$  при внутрицентровом лазерном возбуждении малой интенсивности (0,1 МВт/см<sup>2</sup>) соответствует 45 нс. Отсюда можно считать, что затягивание импульсов КЛ и РЛ происходит по единому механизму и связано с возбуждением  $\text{Ce}^{3+}$  в  $\text{Y}_2\text{SiO}_5$  путем последовательного захвата, наведенных радиацией, зонных дырок и электронов.

Для уточнения измерена зависимость фотопроводимости от интенсивности ( $I$ ) лазерного (353 нм) возбуждения кристаллов  $\text{Ce:Y}_2\text{SiO}_5$ . Обнаружена, параболическая зависимость нарастания фототока с увеличением  $I$ , которая указывает на двухступенчатую ионизацию  $\text{Ce}^{3+}$ . При этом наводятся только зонные электроны  $e$ . Как показали измерения, при этом время затухания ФЛ  $\text{Ce}^{3+}$  соответствует 45 нс и практически не зависит от интенсивности лазерного возбуждения до 0,5 МВт/см<sup>2</sup>. С увеличением  $I > 1$  МВт/см<sup>2</sup>, наблюдается фототок в кристаллах  $\text{Y}_2\text{SiO}_5$ , указывающий на двухфотонную ионизацию собственного вещества. В этом случае наводятся зонные электроны ( $e$ ) и дырки ( $h$ ). Поэтому при облучении кристаллов  $\text{Ce:Y}_2\text{SiO}_5$  лазерным излучением  $I > 1$  МВт/см<sup>2</sup>, когда наблюдается удлинение времени затухания ФЛ  $\text{Ce}^{3+}$  до 80 нс при 5 МВт/см<sup>2</sup>, нужно считать, что в этом случае механизм возбуждения ФЛ, как КЛ и РЛ,  $\text{Ce}^{3+}$  происходит с участием наведенных зонных дырок и электронов.

## ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ ОБЪЕМНЫХ ПИКОСЕКУНДНЫХ ГАЗОВЫХ РАЗРЯДОВ В ПОЛЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

В. И. Барышников<sup>1</sup>, В. Л. Паперный<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Иркутский государственный университет путей сообщения,  
Россия, г. Иркутск, [vibh@rambler.ru](mailto:vibh@rambler.ru)*

<sup>2</sup>*Иркутский государственный университет, Россия, г. Иркутск*

Важным направлением развития лазерных комплексов большой мощности является разработка систем основанных на усилении фемтосекундных импульсов на длине волны 248 нм (третья гармоника Ti:Sp-лазера) в активной среде газа KrF. Данные лазерные усилители работают при низких давлениях газа и, как следствие имеют большие объемы газовых активных сред. Для поджига наносекундного разряда газовых систем повышенного давления разработан малогабаритный пикосекундный сильноточный генератор объемного разряда.

Пикосекундный генератор объемного газового разряда представляет собой малоиндуктивную конструкцию, состоящую из камеры газового разряда и сильноточного генератора высоковольтных импульсов. Мощный малогабаритный генератор пикосекундных (200 пс) сильноточных (5 кА) высоковольтных (280 кВ) импульсов выполнен по схеме генератора Тесла, где емкость выходного контура разделена и ее равные составляющие образуют двухступенчатый генератора Маркса. Внешняя обкладка второй ступени генератора Маркса дополнительно выполняет функцию согласующей линии и обеспечивает режим бегущей волны.

На основе измерений интенсивности излучения объемного ВУФ-УФ разряда в ксеноне, азоте, аргоне (1–3 атм) с помощью *pin*-фотодиода с открытым окном (0,12–650 нм), ФЭУ-142 с монохроматором ВМС-1 (100–340 нм) и анализа данных эксперимента установлено, что излучение занимает область 10–400 нм, главным образом, в виде распределения Планка, указывающее на его тепловую природу. ВУФ-УФ линейчатый спектр излучение ксенона на фоне теплового слабо выражен. Для уточнения проведены исследования объемного пикосекундного разряда в ксеноне (3 атм) путем зондирования излучением фемтосекундного лазера (2 $\omega$ :4 $\omega$ :Ti:Sp:170–225 нм и 360–400 нм, 320 МГц, 50 фс). Обнаружено короткоживущее (< 1 нс) широкополосное бесструктурное ВФ-УФ поглощение, спектральное распределение которого повторяет спектр теплового излучения. Данный результат подтверждает тепловой характер ВУФ-УФ излучения сильноточного объемного пикосекундного разряда.

## ПОЛУПРОВОДНИКИ СО СТРУКТУРНЫМ ФАЗОВЫМ ГРАДИЕНТОМ

Э. И. Батталова, С. С. Харинцев

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики,  
Россия, г. Казань, [eibattalova@stud.kpfu.ru](mailto:eibattalova@stud.kpfu.ru)*

Дефекты кристаллической решётки оказывают существенное влияние на оптические и электронные свойства полупроводников [1]. Точечные структурные дефекты выступают в роли оптических наноантенн, способных увеличивать локальную плотность электромагнитных состояний. Концентрация дефектов в полупроводниках изменяется при фазовых переходах второго рода. Её можно настраивать путём контролируемого изменения температуры.

В настоящей работе демонстрируется градиентная фазовая структура микрокристаллов неорганических галоидных перовскитов CsPbBr<sub>3</sub>, полученная с помощью термоплазменной метаповерхности. Термоплазменная метаповерхность представляет собой двумерный массив наноразмерных тепловых источников. Она позволяет создавать субволновые температурные профили за счёт локального оптического нагрева [2]. В рамках исследования показано, что управляемый оптический нагрев позволяет настраивать фазовую структуру перовскита. Кристалл перовскита, помещённый на термоплазмонную метаповерхность, может находиться в многофазном состоянии [3]. В такой системе структурные дефекты выступают в роли зарядовых аттракторов, благодаря чему усиливается квантовый выход фотолюминесценции. Подобные структуры могут быть использованы при разработке дисплеев, а также компактных широкополосных источников света.

### Литература

1. H.J. Queisser, E.E. Haller, *Science*, 281(5379), 945–950 (1998).
2. S.S. Kharintsev, A.V. Kharitonov, E.A. Chernykh, A.M. Alekseev, N.A. Filippov, S.G. Kazarian, *Nanoscale*, 14(33), 12117–12128 (2022).
3. S.S. Kharintsev, E.I. Battalova, T.A. Mukhametzyanov, A.P. Pushkarev, I.G. Scheblykin, S.V. Makarov, E.O. Potma, D.A. Fishman, *ACS Nano*, 17(10) 9235–9244 (2023).



## ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОТРАНСФОРМАЦИИ АНТИБИОТИКА В ВОДЕ

Н. П. Безлепкина<sup>1</sup>, О. Н. Чайковская<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г. Томск, [nadezhda.bezlepkina174833@mail.ru](mailto:nadezhda.bezlepkina174833@mail.ru)

<sup>2</sup>Институт электрофизики УрО РАН, Россия, г. Екатеринбург

В данной работе представлены результаты спектрально-люминесцентного исследования эффективности фототрансформации сульфатуанидина, синтезированного коммерческой фирмой Sigma-Aldrich, в воде под действием УФ-излучения ХеВг и КгСl эксиламп с длиной волны излучения 282 нм и 222 нм, соответственно. Облучение водных растворов проводили при комнатной температуре в стационарном фотореакторе при комнатной температуре. Начальная концентрация исследуемого вещества составляла  $5 \times 10^{-5}$  М. Убыль антибиотика регистрировали на спектрофлуориметре СМ2203 (SOLAR, Беларусь) по стандартной методике. Контрольное время облучения составляло: 0, 1, 2, 4, 8, 16, 32 и 64 мин.

Спектры поглощения характеризуются снижением интенсивности поглощения в максимуме полосы на 260 нм, а также появлением поглощения в области от 260 до 400 нм и широкой полосы с максимумом в области 560 нм в процессе облучения КгСl и ХеВг эксилампами. Данные изменения указывают на фототрансформацию исходной молекулы и образование различных фотопродуктов. При облучении от 0 до 64 мин зафиксированы падение интенсивности флуоресценции (длина волны возбуждения флуоресценции 260 нм) в области 342 нм и рост в области 590 нм (длина волны возбуждения флуоресценции 500 нм). Анализ константы скорости убыли сульфатуанидина в воде под действием излучения КгСl и ХеВг эксиламп указывает на то, что под действием излучения ХеВг эксилампы эффективность фототрансформации сульфатуанидина в воде выше, чем после облучения КгСl эксилампой. При этом максимальная убыль сульфатуанидина составляет 89 % под действием излучения ХеВг эксилампы.

*Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030), проект № НУ 2.0.7.22 МЛ.*

## ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ МИШЕНИ ИЗ МЕДИ

Д. М. Безверхняя, А. Т. Саакян, В. Н. Пузырёв

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН,  
Россия, г. Москва, [d.bezverkhnyaya@mail.ru](mailto:d.bezverkhnyaya@mail.ru)

Использование мягкого рентгеновского излучения для модификации поверхности материалов, а также для исследования структуры веществ и биологических объектов является активно развивающейся областью научных исследований [1–3]. В данной работе исследовались временные характеристики рентгеновского излучения при воздействиях лазерного импульса на мишень из сплошной меди. В экспериментах использовалось излучение лазера на неодимовом стекле с длиной волны 1,06 мкм и длительностью импульса по полувысоте 2,7 нс, при этом плотность мощности излучения на поверхности мишени составляла  $\sim 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>.

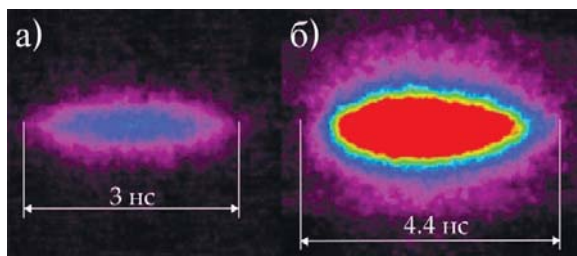


Рис. Изображение эволюции разлёта плазмы в рентгеновском диапазоне спектра в режиме линейной развёртки при энергии лазерного импульса а) 5 Дж; б) 21,6 Дж

На рисунке представлены изображения излучения плазмы в диапазоне 1–16 Å, полученные при различных энергиях лазерного импульса в режиме линейной развёртки. Данные изображения демонстрируют возрастание интенсивности и длительности, а также пространственного размера излучения плазмы при увеличении энергии воздействующего лазерного импульса.

### Литература

1. В.Г. Средин, А.В. Войцеховский, О.Б. Ананьин, А.П. Мелехов, С.Н. Несмелов, С.М. Дзядух, *Прикладн. физика*, № 4, 54–60 (2018).
2. B. Rösner, S. Finizio, F. Koch et al., *Optica*, 7(11), 1602–1608 (2020).
3. V. Loconte, K.L. White, *Mol. Metab.*, 57, 101421 (2022).

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ СЛОЖНОГО СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА В МЕТОДАХ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ФОРМЫ ФРОНТОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ТЕПЛОВУЮ ИСТОРИЮ КРИСТАЛЛОВ

В. С. Бердников, В. А. Винокуров, В. В. Винокуров, В. А. Гришков,  
С. А. Кислицын, К. А. Митин, А. В. Михайлов

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,  
Россия, г. Новосибирск, berdnikov@itp.nsc.ru*

Методами направленной кристаллизации из расплавов получают большую часть монокристаллов для создания изделий современной техники различного назначения. К основным относятся методы Чохральского, Бриджмена и горизонтальной направленной кристаллизации (ГНК). С точки зрения причин генерации конвективных течений и влияния особенностей конвективного теплообмена на качество кристаллов основное отличие методов заключается в разных направлениях градиентов температуры и фронтов кристаллизации (ФК) относительно вектора силы тяжести. От этого зависит относительная роль сил плавучести в генерации течений расплавов на фоне центробежных сил, сил Кориолиса и термокапиллярного эффекта. В результате существенно отличаются распределения температуры, пространственные формы и интенсивность течений, что приводит к особенностям локального теплообмена на ФК.

Экспериментально и численно проведены исследования процессов кристаллизации жидкостей – имитаторов расплавов с различными числами Прандтля: гептадекана и воды на охлаждаемых стенках и дисках в режимах свободной конвекции при геометриях, характерных для перечисленных методов. Кристаллизация на дисках исследована в режимах смешанной конвекции при вращении только моделей кристаллов в неподвижных тиглях и в различных режимах вращения кристаллов и тигля (метод Чохральского). Моделирование процессов в методе Бриджмена выполнено в режимах с неподвижным и вращающимся цилиндрическим тиглем и с неподвижным прямоугольным тиглем. Численно исследованы так же процессы кристаллизации кремния методами Чохральского и Бриджмена. Во всех случаях исследовались процессы ламинарно-турбулентных переходов течений расплавов во всем объеме и в пограничных слоях на ФК. Изучена эволюция пространственных форм течений и их влияние на форму ФК. Исследовалось влияние амплитудно-частотных характеристик пульсаций температуры на мгновенные формы ФК. Численно моделирование проведено в режимах нестационарного сопряженного теплообмена с определением полей температуры в расплавах, в стенках тиглей и в закристаллизовавшемся веществе.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ВОДЫ НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТЕНКЕ

С. А. Кислицын, А. В. Михайлов, К. А. Митин, В. С. Бердников

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,  
Россия, г. Новосибирск, [berdnikov@itp.nsc.ru](mailto:berdnikov@itp.nsc.ru)*

Метод горизонтальной направленной кристаллизации – один из методов получения монокристаллов из расплавов. Одним из критериев получения качественных монокристаллов является продвижение плоского фронта кристаллизации (ФК) на всех этапах роста кристалла. Форма ФК зависит от особенностей сопряженного конвективного теплообмена как в контейнере с расплавами, обладающими различными теплофизическими свойствами, так и в ростовой камере. Эволюция пространственных форм течений и полей температуры при кристаллизации расплавов, обладающих инверсной зависимостью плотности от температуры, обладает специфическими особенностями в отличие от расплавов со стандартными зависимостями плотности от температуры. Вода, галлий, эвтектика кадмий-ртуть-теллур (КРТ) – примеры таких расплавов. Кристаллы КРТ применяются в технике, работающей в ИК-диапазоне.

Экспериментально и численно проведены исследования процесса кристаллизации гептадекана и воды на охлаждаемой вертикальной стенке в прямоугольной полости. Вода является модельной жидкостью – имитатором расплавов, обладающих инверсной зависимостью плотности от температуры. Изучена эволюция пространственной формы течения и ее влияние на форму фронта кристаллизации, в зависимости от высоты слоя воды и перепадов температуры между вертикальными стенками. Численно проведено моделирование при различных краевых условиях на верхней границе слоя жидкости, в том числе с учетом термокапиллярного эффекта при свободной верхней границе. В экспериментах кристаллизация начинается после значительного переохлаждения слоя воды в пристеночной области. В начале процесса кристаллизации наблюдается резкий рост температуры из-за выделения теплоты кристаллизации. При численном моделировании кристаллизация начинается при охлаждении воды ниже температуры кристаллизации. В режимах кристаллизации воды наблюдается формирование двух конвективных ячеек. В одной циркулирует вода с температурой от температуры нагретой стенки до  $+4$  °С. Во второй с температурой от  $+4$  до  $0$  °С и с противоположным направлением циркуляции. Размеры и взаимное расположение этих ячеек зависят от перепадов температуры и высот слоев жидкостей. Экспериментально и численно изучена относительная роль сил плавучести и термокапиллярного эффекта на гидродинамику, конвективный теплообмен и на формы ФК воды и гептадекана.

## ТЕПЛОТДАЧА ОТ КРЕМНИЕВЫХ СТЕРЖНЕЙ, РАЗОГРЕВАЕМЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ, ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ МЕТОДОМ СИМЕНСА В РЕЖИМАХ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

К. А. Митин, В. С. Бердников, А. В. Митина

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН  
Россия, г. Новосибирск, [berdnikov@itp.nsc.ru](mailto:berdnikov@itp.nsc.ru)*

Наиболее распространенным методом производства поликристаллического кремния является Сименс-процесс. Полученный с помощью Сименс-процесса поликристаллический кремний используют для получения высокоомного кремния для силовой энергетики методом бестигельной зонной плавки и кремния электронного качества методом Чохральского.

В Сименс-процессе происходит водородное восстановление кремния на поверхности разогреваемых электрическим током затравочных кремниевых стержней из прокачиваемого через реактор высокочистого газа трихлорсилана либо моносилана (для БЗП процесса). На начальной стадии Сименс-процесса затравочные стержни разогреваются до температуры, при которой кремний становится проводящим, после чего с помощью подбора электрического напряжения стержни разогреваются и поддерживаются при заданной температуре (1100 °С). По мере роста диаметра стержней напряжение постепенно увеличивают для поддержки заданного уровня температуры на их поверхности. Существующие модели Сименс-процесса подразумевают, что за счет разогрева посредством электрического тока, кремниевые стержни разогреваются равномерно.

Численно, методом конечных элементов в трехмерной сопряженной постановке, исследован нестационарный сопряженный свободноконвективный теплообмен, разогреваемого за счет пропускания электрического тока, одиночного кремниевого стержня и различных групп кремниевых стержней. Решалась безразмерная нестационарная система уравнений термогравитационной конвекции в переменных вихрь скорости, векторный потенциал поля скорости и температура. Расчеты проведены при перепаде температуры между стержнями и корпусом реактора, характерном для реальной технологии.

Показано, что за счет натекания холодного потока газа на основании кремниевых стержней и развития пограничных слоев в стержнях формируется неоднородное поле температуры, причем не только в осевом, но и радиальном направлении. В случае присутствия в реакторе группы стержней, за счет сложной трехмерной пространственной формы конвективных течений, неоднородность полей температуры в кремниевых стержнях увеличивается.

## ОБОБЩЁННЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЁТА ОСТРОЙ ФОКУСИРОВКИ ПРОИЗВОЛЬНЫХ КОЛЛИМИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ЛУЧЕЙ

С. В. Бойченко

*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН  
Россия, г. Иркутск, [ste89@yandex.ru](mailto:ste89@yandex.ru)*

В настоящем исследовании разработан алгоритм для расчета острой фокусировки коллимированного непрерывного лазерного луча с произвольным распределением светового поля в поперечном сечении. Рассматривается общий случай фокусировки луча в плоский микрорезонатор Фабри – Перо. Расчёт поля проводится посредством процедуры одинарного интегрирования вместо двойного, применяемого в оригинальном методе Ричардса – Вольфа [1].

Предложенный алгоритм реализуется следующим образом. Во-первых, для представления, как светового поля входного лазерного луча, так и фокального светового поля используется базис циркулярной поляризации, так как в нём декартовы и цилиндрические единичные векторы имеют практически одинаковое представление. Во-вторых, используется разложение входного луча в линейную суперпозицию вихревых пучков с различными топологическими зарядами; данная суперпозиция может представлять собой как конечную сумму, так и бесконечный ряд. В итоге входной луч, представленный суперпозицией вихревых циркулярно-поляризованных лучей, преобразуется, в результате фокусировки, в фокальное поле, представленное суперпозицией вихревых циркулярно-поляризованных полей, причём амплитуды этих полей рассчитываются как однократные интегралы по полярному углу от входных амплитуд.

На примере острой фокусировки вихревого луча с дробным топологическим зарядом продемонстрирована работа предложенного алгоритма. Показано, что время расчёта сокращается не менее чем на порядок по сравнению с алгоритмом двухкратного интегрирования.

*Работа поддержана научным проектом 0243-2021-0004 в рамках плана фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 г.*

### Литература

1. B. Richards, E. Wolf, *Proc. R. Soc. London A*, 253, 358–379 (1959).

## ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

К. Н. Болдырев, Н. Ю. Болдырев, М. Н. Попова

*Институт спектроскопии РАН, Россия, г. Москва, г. Троицк,  
[kn.boldyrev@gmail.com](mailto:kn.boldyrev@gmail.com)*

Люминесцентная спектроскопия как оптический метод исследования имеет более высокую чувствительность в сравнении с спектроскопией пропускания/поглощения/отражения, поскольку в ней регистрируется только полезный сигнал. Кроме того, люминесценция дает больше информации, так как позволяет проводить исследования при разных длинах волн возбуждения, позволяя разделять разные оптические центры и изучать переходы между возбужденными энергетическими состояниями. Все это делает методы люминесцентной спектроскопии незаменимыми помощниками в изучении свойств материалов. До сих пор широкополосные люминесцентные методы высокого разрешения не применялись в твердотельных исследованиях. В данной работе мы восполняем этот пробел. Создана установка на основе Фурье-спектрометра для регистрации спектров люминесценции высокого разрешения в широком спектральном диапазоне (от ТГц до УФ) и продемонстрированы ее возможности и преимущества на нескольких материалах для квантовых применений. Для этого был спроектирован высоковакуумный люминесцентный модуль большой светосилы, в котором можно было разместить криостаты, а также магниты для зеэмановской люминесцентной спектроскопии. Кроме того, разработан светосильный модуль регистрации люминесценции с возможностью установки большого набора различных высокочувствительных детекторов. Для возбуждения люминесценции можно использовать широкий спектр перестраиваемых диодных лазеров, титан-сапфировый перестраиваемый лазер или рентгеновскую трубку. Все это позволяет регистрировать спектры излучения в диапазоне  $50\text{--}50000\text{ см}^{-1}$  при температурах от 4 до 350 К со спектральным разрешением лучше  $0,001\text{ см}^{-1}$ .

Наиболее интересные результаты были получены для монокристаллов  $\text{LiYF}_4:\text{Ho}$  [1–3]. В спектрах люминесценции кристаллов впервые обнаружены сверхтонкая и изотопическая структуры [1–3], антипересечения сверхтонких уровней во внешнем магнитном поле [1] и связанные с ними дополнительные структуры [2], деформационные расщепления [1], особенности в синглет-синглетных переходах [3]. Измеренная ширина линии фотолюминесценции  $0,002\text{ см}^{-1}$  [1] является, насколько нам известно, наименьшей неоднородной шириной линии, когда-либо наблюдавшейся в спектрах люминесценции кристаллов. Мы предлагаем использовать люминесценцию  $\text{LiYF}_4:\text{Ho}$  для создания дистанционных датчиков (1) магнитного поля, не требующих дополнительного постоянного или переменного магнитного поля и/или СВЧ-поля и способных работать в очень ши-

роком диапазоне измеряемых магнитных полей; (2) низких и сверхнизких температур; (3) одновременно магнитного поля и температуры. Среди других результатов, полученных с помощью данной методики, следует отметить гигантское деформационное расщепление линий в спектрах псевдокубических кристаллов перовскита  $\text{LaAlO}_3$  [4,5], исследования уровней кристаллического поля в кристаллах  $\text{YPO}_4:\text{Pr}^{3+}$  [6] и  $\text{ASL}:\text{Pr}^{3+}$  [7], изотопических сдвигов в алмазах с центрами окраски  $\text{SiV}$  [8].

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научно-го фонда (в рамках гранта № 23-12-00047).*

### Литература

1. K.N. Boldyrev, B.Z. Malkin, M.N. Popova, *Light Sci. Appl.*, 11, 245 (2022).
2. K.N. Boldyrev, B.Z. Malkin, M.N. Popova, *J. Lumin.*, 247, 118902 (2022).
3. K.N. Boldyrev, M.N. Popova, *J. Lumin.*, 252, 119340 (2022).
4. K.N. Boldyrev, N.M. Abishev, I.E. Mumdzi, S.I. Nikitin, B.Z. Malkin, R.V. Yusupov, M.N. Popova, *Opt. Mater. X*, 14, 100155 (2022).
5. K.N. Boldyrev, N.M. Abishev, I.E. Mumdzi, S.I. Nikitin, P. Deren, B.Z. Malkin, M.N. Popova, *Phys. Rev. B*, 103, 054103 (2021).
6. S.A. Klimin, E.P. Chukalina, K.N. Boldyrev, T.A. Igolkina, M.S. Radionov, M.C. Chou, M.N. Popova, *J. Lumin.*, 235, 118003 (2021).
7. S. Sattayaporn, P. Loiseau, G. Aka, S. Klimin, K. Boldyrev, B. Mavrin, *J. Lumin.*, 219, 116895 (2020).
8. V.G. Ralchenko, V.S. Sedov, A.K. Martyanov, A.P. Bolshakov, K.N. Boldyrev, V.S. Krivobok, S.N. Nikolaev, S.V. Bolshedvorskii, O.R. Rubinas, A.V. Akimov, A.A. Khomich, E.V. Bushuev, R.A. Khmel'nitskiy, V.I. Konov, *ACS Photonics*, 6(1), 66–72 (2019).

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ РЕНТГЕНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ КАРБИДА КРЕМНИЯ ПОЛИТИПНЫХ МОДИФИКАЦИЙ 4Н И 6Н

К. Н. Болдырев, Э. С. Сектаров

*Институт спектроскопии РАН, Россия, г. Москва,  
г. Троицк, [kn.boldyrev@gmail.com](mailto:kn.boldyrev@gmail.com)*

Карбид кремния является широкозонным полупроводником, обладающим множеством уникальных свойств, таких как высокое критическое поле лавинного пробоя, высокая теплопроводность, чрезвычайная химическая и термическая стойкость, механическая прочность [1]. Кроме того, близость физических и химических свойств, а также параметров кристаллических решеток с другими полупроводниковыми материалами, такими как  $\text{AlN}$ ,  $\text{GaN}$ , алмаз позволяют создавать на основе этих материалов слоистые структуры и твердые растворы с варьируемой шириной запрещенной зоны. Высокая подвижность электронов и дырок, а также высокая теплопроводность дают преимущества перед наиболее известными аналогами, такими как узкозонный кремний (Si), в радиационно-стойкой,



высокомощной и высокочастотной электронике, а также в оптоэлектронике, работающей в глубоком УФ-диапазоне, в устройствах квантовой информации и приложениях для работы в экстремальных условиях. Кроме того, SiC является отличным фотопроводником, и это свойство может быть использовано для УФ- и рентгеновских детекторов со сверхвысокой чувствительностью. Поглощение и люминесценция SiC определяются электронными переходами в центрах окраски – дефектах кристаллической решётки. Изучение видов и свойств центров окраски в карбиде кремния открывает ряд возможностей для его применений в квантовой электронике. Благодаря полиморфизму карбида кремния, в нём существует большое разнообразие центров окраски, характерных для различных политипов, схожих по свойствам с хорошо изученным NV-дефектом в алмазе [2], образующимся из-за связи вакансии углерода с атомом азота. Использование дефектов SiC в качестве источников одиночных фотонов [3; 4] имеет дальнейшие применения в квантовой радиометрии, квантовых изображениях со сверхвысоким пространственным разрешением и др. Ранее нами были выполнены исследования монокристаллов карбида кремния гексагональных политипных модификаций методами люминесцентной ИК-спектроскопии высокого разрешения. Зарегистрированные спектры низкотемпературной люминесценции SiC в ближнем ИК-диапазоне показало наличие большого количества чрезвычайно узких полос, имеющих синглетную, дублетную, триплетную и квартетную структуры [5]. В настоящей работе мы провели исследования спектров рентгенолюминесценции гексагональных политипов карбида кремния при различных температурах ( $-196 \dots -500$  °C). При низких температурах ( $< -150$  °C) мы зарегистрировали длительное послесвечение (времена затухания более 120 с), обнаруженное нами ранее в алмазах с бором и приписываемое А-полосе алмаза. Мы предполагаем, что природа этой рентгенолюминесценции имеет общую природу с наблюдаемой во многих алмазах А-полосой. Кроме того, были установлены спектральные и временные зависимости для различных политипных модификаций SiC.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научно-го фонда (грант № 19-72-10132-П).*

#### Литература

1. G.R. Fisher, P. Barnes, *Philos. Mag. B*, 61, 217–236 (1990).
2. A. Gruber, A. Dräbenstedt, C. Tietz, L. Fleury, J. Wrachtru, C. von Borczyskowski, *Science*, 276, 2012–2014 (1997).
3. A. Beveratos, S. Kühn, R. Broui, T. Gacoin, J.P. Poizat, P. Grangier, *Eur. Phys. J. D*, 18, 191–196 (2002).
4. J.M. Taylor, P. Cappellaro, L. Childress, L. Jiang, D. Budker, P.R. Hemmer, A. Yacoby, R. Walsworth, M.D. Lukin, *Nat. Phys.*, 4, 810–816 (2008).
5. К.Н. Болдырев, Д.Д. Гуценко, С.А. Климин, Н.Н. Новикова, Б.Н. Маврин, М.Н. Маякова, В.М. Хныков, *Опт. и спектр.*, 128(9), 1264–1268 (2020).

## ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ НИКЕЛЕВЫХ ЦЕНТРОВ В АЛМАЗНЫХ ОБРАЗЦАХ

З. И. Бородулин<sup>1</sup>, Л. А. Васильева<sup>1</sup>, М. А. Шулепов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Россия, г. Томск, [zahar.borodulin12@gmail.com](mailto:zahar.borodulin12@gmail.com)

<sup>2</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, г. Томск

Исследование электролюминесценции центров окраски в алмазе актуально для задач создания алмазных светодиодов, которые будут использоваться в квантовых технологиях и бортовом оборудовании космических аппаратов [1].

В рамках данной работы было исследовано 3 алмазных образца синтезированных методом температурного градиента. Образцы отличались толщиной и концентрацией примеси. Свечение, регистрируемое спектрометром, возникало при комнатной температуре при подаче напряжения на образец 17 В, 26 В, 52 В для С13, С36, С34 образцов, соответственно. Регистрация спектров происходила с помощью спектрометра Ocean Optics HR 2000 с диапазоном чувствительности 190–1100 нм. Спектры электролюминесценции образцов демонстрировали общую интенсивную полосу на 545 нм, что соответствует никель-азотным центрам. При исследовании КР спектров образцов наблюдалась общая полоса на  $1079 \text{ см}^{-1}$ , обусловленная примесью никеля, который добавляется в качестве катализатора-растворителя в шихту при синтезе алмаза [2].

Для исследования электрических характеристик были измерены вольтамперные характеристики образцов. В областях образца с максимальной интенсивностью электролюминесценции вольтамперная характеристика имела несимметричный характер зависимости с явным преобладанием величины прямого тока над обратным. Также обнаружен факт существенного увеличения прямого и обратного токов при вакуумировании образца. При этом максимальное увеличение прямого тока составило 30 %, а обратного – 60 %. Из наклона вольтамперной характеристики были определены высоты барьеров: для С13 образца – 0,699 эВ, для С36 образца – 0,809 эВ, для С34 образца – 0,687 эВ.

*Исследование было выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2020-0048.*

### Литература

1. Р.А. Хмельницкий, Н.Х. Галипов, Г.В. Чучева. Синтетический алмаз для электроники и оптики. М.: Издательство ИКАР, 2017. 228 с.
2. A.M. Zaitsev. Optical Properties of Diamond: A Data Handbook. Berlin: Springer, 2001. 502 p.

## ИЗУЧЕНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ ТИАЗИНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ

О. Н. Чайковская<sup>1,2</sup>, Е. Н. Бочарникова<sup>1</sup>, В. С. Чайдонова<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г. Томск, [bocharnikova.2010@mail.ru](mailto:bocharnikova.2010@mail.ru)

<sup>2</sup>Институт электрофизики УрО РАН

Россия, г. Екатеринбург, [tchon@phys.tsu.ru](mailto:tchon@phys.tsu.ru)

<sup>3</sup>Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Хакасия,  
Россия, г. Абакан, [krayvlada0523@mail.ru](mailto:krayvlada0523@mail.ru)

В качестве объектов исследования были выбраны два основных тиазиновых красителя – N,N,N',N'-тетраметилтионина хлорид тригидрат (метиленовый синий, МС) и тетраметил-4,4'-диаминотрифенилметан (метиленовый зеленый, МЗ). Молекулы класса тиазиновых красителей содержат в своей структуре атомы серы, азота и кислорода. Первоначально этот класс молекул использовался в качестве красителей для эластичных тканей, волокон и соединительных тканей, а в настоящее время эти вещества используются в качестве контрастного красителя для окрашивания биологических тканей для оптической визуализации и дифференцировки клеток крови. Структурные формулы исследуемых красителей приведены на рисунке.

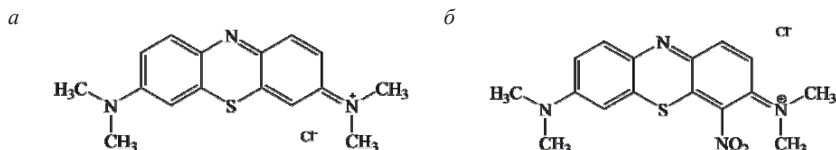


Рис. Структурные формулы исследуемых красителей:  
*a* – метиленовый синий; *б* – метиленовый зеленый

Области поглощения от 270 до 350 нм для МС и 220–300 нм для МЗ чувствительны по форме и интенсивности на изменение растворителя. Время жизни в возбужденном состоянии уменьшается в следующем порядке: изопропанол>ацетонитрил≈этанол≈диметилсульфоксид>>вода для МЗ и хлороформ>ацетонитрил≈этанол≈диметилсульфоксид>>вода≈изопропанол для МС. Получены люминесцентные характеристики тиазиновых красителей. При снижении температуры от 298 до 77 К зафиксировано увеличение интенсивности флуоресценции красителей в этаноле: в 250 раз для МЗ и в 7 раз для МС. Кроме того, МЗ в этаноле и хлороформе имеет интенсивную фосфоресценцию при 77 К.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030, проект № НУ 2.0.7.22 МЛ).

## ФОРМИРОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ НАТРИЯ В РАДИАЦИОННО-ОБРАБОТАННЫХ КРИСТАЛЛАХ NaF ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА И ОБЛУЧЕНИЯ СВЕТОМ

Л. И. Брюквина<sup>1</sup>, С. В. Липко<sup>2</sup>, Н. А. Иванов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН,  
Россия, г. Иркутск, [baikal@ilph.irk.ru](mailto:baikal@ilph.irk.ru)

<sup>2</sup>Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН,  
Россия, г. Иркутск, [slipko@yandex.ru](mailto:slipko@yandex.ru)

<sup>3</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Россия, г. Иркутск, [ivnik@istu.edu](mailto:ivnik@istu.edu)

Авторы работы исследовали механизмы образования и свойства наночастиц натрия (НЧц Na), образованных в радиационно-обработанных кристаллах NaF, после фото-обесцвечивания и термоотжига. Результаты подобных исследований были представлены ранее в работах [1; 2]. В данной работе выявлены новые характеристики НЧц, сформированных в кубическом кристалле. На рис. 1 представлены AFM снимок НЧц Na и профиль одной НЧ Na.

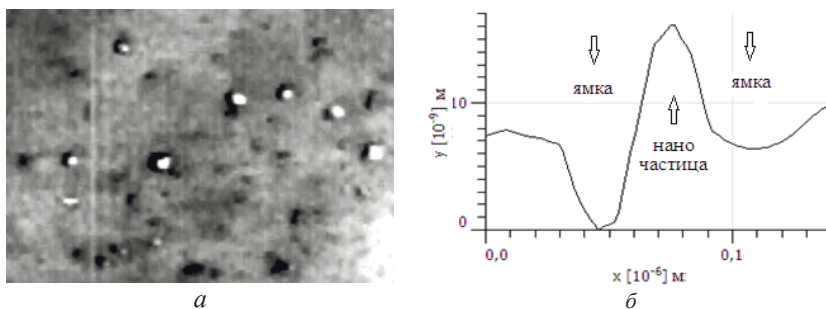


Рис. а – AFM снимок НЧц Na и ямок; б – профиль НЧ Na, лежащей в ямке

Работа поддержана научным проектом 0243-2021-0004 в рамках плана фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 г.

### Литература

1. L.I. Bryukvina, E.F. Martynovich, *Phys. Solid State*, 54(12), 2374–2379 (2012).
2. L. Bryukvina, N. Ivanov, S. Nebogin, *J. Phys. Chem. Solids*, 120, 133–139 (2018).

## ИК КОЛЕБАНИЯ ПРИМЕСНЫХ КОМПЛЕКСОВ В КРИСТАЛЛАХ ФТОРИДА КАЛЬЦИЯ, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ $\text{OH}^-$ , $\text{Ce}^{3+}$ , $\text{Eu}^{3+}$

Л. И. Брюквина

Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН  
Россия, г. Иркутск, [baikal@ilph.irk.ru](mailto:baikal@ilph.irk.ru)

В работе изучались ИК колебания примесных комплексов  $\text{Re}^{3+}\text{-OH}^-$  в  $\text{CaF}_2$  кристаллах. Ранее нами изучалось образование центров окраски в щелочно-земельных фторидах, легированных  $\text{Re}^{3+}$  примесью [1; 2]. В настоящей работе установлено, что полоса поглощения в области  $3643\text{--}3646\text{ см}^{-1}$  принадлежит колебаниям «свободных» ионов  $\text{OH}^-$  в анионных узлах. Ионы  $\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$  примесей образуют комплексы с ионом гидроксила. Вследствие этого появляются дополнительные полосы поглощения в области колебаний ионов гидроксила. На рис. представлены спектры колебаний комплексов  $\text{Re}^{3+}\text{-OH}^-$  в  $\text{CaF}_2$  при комнатной температуре.

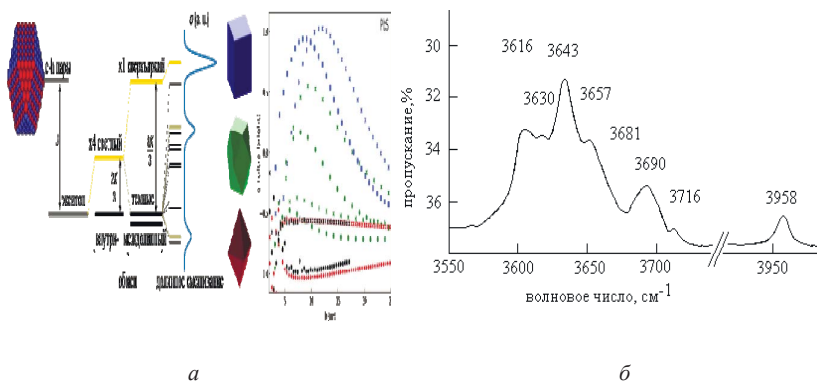


Рис. а – колебания примесных комплексов в  $\text{CaF}_2\text{:Ce}^{3+}$  (1,0 мол. %) после 2 ч отжига при 1100 К; б – колебания примесных комплексов в  $\text{CaF}_2\text{:Ce}^{3+}$  (0,15 мол. %),  $\text{Eu}^{3+}$  (0,5 мол. %) после 2 ч отжига при 1100 К

Работа поддержана научным проектом 0243-2021-0004 в рамках плана фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 г.

### Литература

1. L.I. Bryukvina, E.E. Penzina, *J. Appl. Spectrosc.*, 77, 104–109 (2010).
2. Л.И. Брюквина, Э.Э. Пензина, К.Н. Болдырев. *Изв. вузов. Физика*, 54(2/2), 98–105 (2011).

## МИКРОСКОПИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ДИРАКОВСКИХ СОСТОЯНИЙ В КВАНТОВЫХ ЯМАХ HgTe/CdHgTe

Г. В. Будкин, М. В. Дурнев, С. А. Тарасенко

*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН  
Россия, г. Санкт-Петербург, [gbudkin@gmail.com](mailto:gbudkin@gmail.com)*

Гетероструктуры на основе теллурида ртути относятся к широко используемым материалам для инфракрасных и терагерцовых детекторов и являются перспективными материалами для создания высококачественных топологических изоляторов. Из-за инвертированной зонной структуры HgTe в таких материалах возможна широкая перестраиваемость энергетического спектра, в частности реализация линейного спектра носителей заряда в квантовых ямах критической ширины.

Нами изучена тонкая структура дираковских состояний в квантовых ямах критической и близкой к критической толщинах HgTe/CdHgTe. Продемонстрировано, что учет объемной инверсионной асимметрии, связанной с отсутствием центра инверсии в решетке цинковой обманки, интерфейсной инверсионной асимметрии, связанной с анизотропией химических связей на интерфейсах квантовой ямы, а также структурной инверсионной асимметрии приводит к антипересечению энергетических уровней и снимает вырождение дираковских состояний даже при нулевом волновом векторе.

Для (01h)-ориентированных квантовых ям HgTe/CdHgTe, где l и h – индексы Миллера, разработана микроскопическая теория тонкого расщепления и получен эффективный гамильтониан, описывающий расщепление дираковских состояний. Выполнен численный расчет энергетического спектра в рамках 6-зонной k·p-теории с учетом отсутствия центра инверсии и кубической формы кристаллической решетки, упругих напряжений в квантовой яме и смешивания состояний легких и тяжелых дырок на интерфейсах квантовой ямы [1]. Вычислены параметры эффективного гамильтониана и параметры, описывающие расщепление спектра. Продемонстрировано, что в (01h)-ориентированных ямах спектр анизотропен и содержит четыре вейлевских точки, а их положения зависят от кристаллографической ориентации квантовой ямы и структурной асимметрии. Получены аналитические выражения для энергетического спектра дираковских состояний как функции направлений роста, изучено изменение спектра при переходе от ямы (001) к ямам (013) и (011).

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 21-72-10035).*

### Литература

1. М.В. Дурнев, Г.В. Будкин, С.А. Тарасенко, *ЖЭТФ*, 162(4), 570–579 (2022).

## ГИБРИДНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ТАММОВСКИЕ- МИКРОРЕЗОНАТОРНЫЕ МОДЫ С УПРАВЛЯЕМОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ

Д. С. Бузин<sup>1,2</sup>, П. С. Панкин<sup>1,2</sup>, Д. Н. Максимов<sup>1,2</sup>,  
Г. А. Романенко<sup>1,3,4</sup>, В. С. Сутормин<sup>1,2</sup>, С. В. Наболь<sup>1,2</sup>, Ф. В. Зеленов<sup>4,5</sup>,  
А. Н. Масюгин<sup>4,5</sup>, М. Н. Волочаев<sup>1</sup>, С. Я. Ветров<sup>2,1</sup>, И. В. Тимофеев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН – обособленное подразделение  
ФИЦ КНЦ СО РАН, Россия, г. Красноярск, [dir@iph.krasn.ru](mailto:dir@iph.krasn.ru)

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, Россия, г. Красноярск, [office@sfu-kras.ru](mailto:office@sfu-kras.ru)  
Красноярский научный центр СО РАН, Россия, г. Красноярск, [fic@ksc.krasn.ru](mailto:fic@ksc.krasn.ru)

<sup>3</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика  
М. Ф. Решетнева, Россия, г. Красноярск, [info@sibsau.ru](mailto:info@sibsau.ru)

<sup>5</sup>АО Научно-производственное предприятие «Радиосвязь»,  
Россия, г. Красноярск, [albert.masyugin@mail.ru](mailto:albert.masyugin@mail.ru)

Рассмотрена модель оптического микрорезонатора с анизотропным дефектным слоем в виде жидкого кристалла, в котором могут возбуждаться микрорезонаторные моды [1]. На одно из фотоннокристаллических зеркал микрорезонатора нанесен полупрозрачный слой золота, обеспечивающий возможность возбуждения таммовского плазмон-поляритона. Теоретически и экспериментально исследованы гибридные таммовские микрорезонаторные моды с управляемой добротностью.

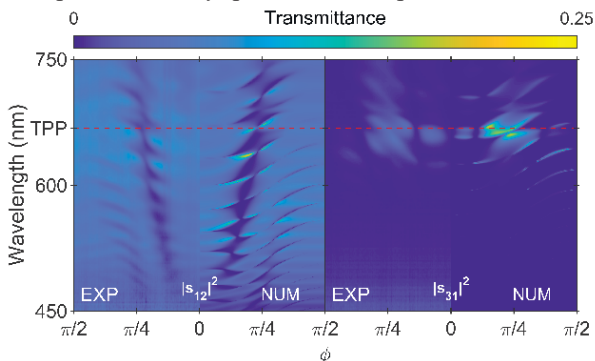


Рис. Слева – модель микрорезонатора. Справа – спектры пропускания микрорезонатора. Видны многочисленные коллапсы спектральных линий, соответствующие реализации связанных состояний в континууме [2]

*Исследование поддержано грантом РФФ № 22-22-00687.*

### Литература

1. P.S. Pankin, V.S. Sutormin, V.A. Gonyakov, F.V. Zelenov, I.A. Tambasov, A.N. Masyugin, M.N. Volochaev, F.A. Baron, K.P. Chen, V.Ya. Zyryanov, S.Ya. Vetrov, I.V. Timofeev, *Appl. Phys. Lett.*, 119(16), 161107 (2021).
2. P.S. Pankin, B.R. Wu, J.H. Yang, K.P. Chen, I.V. Timofeev, A.F. Sadreev, *Commun. Phys.*, 3(1), 91 (2020).

## КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И ИЗЛУЧЕНИЕ ВАВИЛОВА – ЧЕРЕНКОВА В АЛМАЗЕ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР

А. Г. Бураченко<sup>1,2</sup>, В. С. Рипенко<sup>1,2</sup>, А. А. Крылов<sup>1,2</sup>  
К. П. Артемов<sup>1,2</sup>, А. В. Вуколов<sup>2</sup>, Е. И. Липатов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, г. Томск, [bag@loi.hcei.tsc.ru](mailto:bag@loi.hcei.tsc.ru)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, Россия, г. Томск

В данной работе были исследованы спектральные и кинетические характеристики свечения алмазных образцов с различным примесно-дефектным составом при облучении их пучками электронов в широком диапазоне энергией (десятки кэВ–единицы МэВ) и при различных температурах (80–800 К). Показано, что под действием пучков электронов с энергией десятки-сотни кэВ основной вклад в спектры излучения образцов алмаза дает катодолюминесценция (КЛ), а интенсивность излучения Вавилова-Черенкова (ИВЧ) мала, и на уровне чувствительности спектрометра не регистрировалась. При облучении образцов алмаза пучками электронов с энергией 5,7 МэВ ИВЧ было зарегистрировано во всех образцах с хорошей прозрачностью в УФ области спектра. Также было проведено численное моделирование ИВЧ в алмазе с помощью программного кода GEANT4 методом Монте-Карло. Полученные результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Также были получены зависимости температурного тушения КЛ различных центров свечения алмазных образцов для энергий электронов десятки-сотни кэВ.

Полученные данные будут полезны для калибровки и проектирования детекторов электронов, работающих на основе ИВЧ и используемых в условиях высоких температур и высокого радиационного фона, например, в токамаках [1] или в космическом пространстве [2].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00984, <https://rscf.ru/project/22-22-00984/>.

### Литература

1. M.J. Sadowski, *Nukleonika*, 56(2), 85–98 (2011).
2. А.М. Гальпер, *СОЖ*, 6, 75–81 (1999).



## ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРИДА СВИНЦА НА СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ОКСОХЛОРИДНЫХ СВИНЦОВО-БОРАТНЫХ СТЁКОЛ, АКТИВИРОВАННЫХ НЕОДИМОМ

Д. А. Бутенков<sup>1</sup>, А. В. Бакаева<sup>1</sup>, К. И. Рунина<sup>1</sup>,  
А. В. Попов<sup>2</sup>, О. Б. Петрова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева  
Россия, г. Москва, [dabutenkov@gmail.com](mailto:dabutenkov@gmail.com)

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Россия, г. Москва

Оксогоалогенидные стёкла очень перспективны для применений в качестве материалов-матриц для современных лазерных систем и волоконных линий связи в ИК-диапазоне [1]. В ряде работ были исследованы оптические свойства стёкол системы  $PbX_2-PbO-B_2O_3$  ( $X = F, Cl, Br, I$ ) легированных  $d$ -элементами [2; 3] и  $f$ -элементами [1; 4; 5] и доказано положительное влияние галогенидов свинца на спектрально-люминесцентные свойства активаторов в стёклах.

В данной работе были синтезированы стёкла с общей формулой  $xPbCl_2-(50-0,5x)PbO-(49-0,5x)B_2O_3-1NdF_3$ , где  $x$  варьировался от 0 до 40 мол.% с шагом 5 мол.%. Кроме того, была синтезирована неодимовая концентрационная серия стёкол в системе  $30PbCl_2-35PbO-(35-y)B_2O_3-yNdF_3$ , где  $y = 0,1, 0,3, 0,5, 1, 2$  мол.%.

Полученные стёкла прозрачны в диапазоне от 350 нм до 4730 нм. Все синтезированные стёкла проявляют типичную для ионов неодима люминесценцию. Концентрационное тушение наблюдается при введении  $NdF_3$  более 1 мол.%. На контур полос люминесценции и время жизни возбужденных состояний влияет концентрация хлорида свинца в матрице. Гипсохромный сдвиг сверхчувствительного перехода  ${}^4F_{3/2-4}I_{9/2}$  с 876 нм до 874 нм при увеличении содержания  $PbCl_2$  от 0 до 40 мол.% указывает на смену окружения ионов  $Nd^{3+}$  с оксидного на более ионное (хлоридное) [6]. Такое же явление наблюдается и в спектрах поглощения на чувствительных к окружению оптического центра переходах. Помимо данных люминесцентной спектроскопии, на перестройку сетки стекла прямо указывают результаты колебательной спектроскопии и рентгенофазового анализа, косвенно – результаты дифференциально-сканирующей калориметрии и измерения микротвёрдости.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования, Госзадание FSSM-2020-0005.*

### Литература

1. J. Pisarska, *J. Mol. Struct.*, 887(1-3), 201–204 (2008).
2. K.C. Sekhar, A. Hameed, V.G. Sathe, M.N. Chary, M.D. Shareefuddin, *Bull. Mater. Sci.*, 41(3), 79 (2018).
3. W.A. Pisarski, J. Pisarska, R. Lisiecki, Ł. Grobelny, G. Dominiak-Dzik, W. Ryba-Romanowski, *Chem. Phys. Lett.*, 472(4-6), 217–219 (2009).
4. J. Pisarska, *Opt. Appl.*, 40(2), 367–374 (2010).
5. Е.Ф. Кустов, Г.А. Бондуркин, Э.Н. Муравьев, В.П. Орловский, *Электронные спектры соединений редкоземельных элементов*. М.: Наука, 1981. 304 с.

## АТОМАРНО-ТОНКИЕ НАНОСТРУКТУРЫ АПВУ С ЭНАНТИОМЕРНЫМИ ЛИГАНДАМИ КАК ПЛАТФОРМА ДЛЯ ХИРАЛЬНОЙ ФОТОНИКИ

Д. А. Куртина, В. П. Графова, А. И. Лебедев, Р. Б. Васильев

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова  
Россия, г. Москва, romvas@inorg.chem.msu.ru*

Хиральность есть фундаментальное свойство природы, при котором объект не может быть совмещен с зеркальным отражением. Помимо роли в биохимических и химических процессах, хиральность приводит к различному взаимодействию энантиомеров молекул и структур с право- и лево-поляризованным светом. В последнее время большой интерес вызывают хиральные коллоидные наночастицы и наноструктуры [1], демонстрирующие различное поглощение света с правой и левой круговой поляризацией (круговой дихроизм, КД) или вращение плоскости поляризации света (оптическая активность), а также испускание фотонов заданной круговой поляризации (циркулярно-поляризованная люминесценция), что представляет интерес для ряда новых приложений. В докладе рассмотрен новый класс материалов для фотоники – атомарно тонкие 2D наноструктуры халькогенидов кадмия и цинка, гибридные с энантиомерными L-/D-лигандами и проявляющие выраженный КД двумерных экситонов.

Нами разработан метод роста атомарно тонких наноструктур (нанолистов) халькогенидов кадмия и цинка с прецизионной (с точностью 1 монослой) толщиной в диапазоне 0,6–0,9 нм (2–3 монослоя) в коллоидных системах. Была использована коллоидная система ацетат кадмия (цинка)/октаэцен/олеиновая кислота/олеиламин [2] в интервале температур 110–250°C. Для гибридизации наноструктур с хиральными лигандами разработан протокол замены нативного лиганда олеиновой кислоты на стереоизомеры L-/D-цистеина и N-ацетил-L-/D-цистеина. Детальное исследование наноструктур с использованием методов HRTEM, HAADF-STEM, SAED, XRD показало структуру цинковой обманки для CdTe и CdSe и структуру вюрцита для ZnSe с составом  $[M_{n+1}E_nL_2]$  (M-цинк или кадмий, E – халькоген, L – органический лиганд, n – число атомных плоскостей).

Узкие (ширина 8–10 нм) экситонные переходы с участием тяжелой дырки HH, легкой дырки LH и спин-орбитальной дырки SO наблюдались в спектре поглощения наноструктур при комнатных температурах вместе с полосой экситонной люминесценции в спектрах люминесценции. Сильное батохромное смещение до 200 мэВ экситонных полос свидетельствует о сильной гибридизации лиганда и ядра наноструктуры. Хироптические свойства наноструктур исследованы методом КД-спектроскопии и оптического вращения. Спектры КД показывают выраженные знакопеременные полосы, коррелирующие с переходами LH, HH и SO в спектрах поглощения, что подтверждает экситонную природу полос КД. Замена L-

энантиомера лиганда на D-энантиомер инвертирует знак подобно зеркальному отображению с тем же спектральным положением и интенсивностью полос, что подтверждает влияние лиганда на индуцированное предпочтение в поглощении правой или левой круговой поляризации света. Мы обнаружили максимальный g-фактор диссимметрии 0,01, что является самым высоким значением для полупроводниковых наночастиц АПВVI. Обсуждается модель индуцированной хиральности экситонов Ванье-Мотта в геликоидальном потенциале энантиомерных лигандов, которая была подтверждена анализом влияния полярности растворителя, оптического вращения и моделирование координации лигандов. Предлагаются новые возможности для создания искусственных хиральных наноструктур и их поляризационные приложения в фотонике.

*Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 22-13-00101).*

### Литература

1. N.H. Cho, A. Guerrero-Martínez, J. Ma, S. Bals, N.A. Kotov, L.M. Liz-Marzán, K.T. Nam, *Nat. Rev. Bioeng.*, 1, 88–106 (2023).
2. D.A. Kurtina, A.V. Garshev, I.S. Vasil'eva, V.V. Shubin, A.M. Gaskov, R.B. Vasiliev, *Chem. Mater.*, 31(23), 9652–9663 (2019).

## СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ P-i-N СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ АЛМАЗА

Л. А. Васильева, З. И. Бородулин, Е. И. Липатов, В. П. Гермогенов

*Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Россия, г. Томск, [wassil\\_93@mail.ru](mailto:wassil_93@mail.ru)*

Для получения электролюминесценции в алмазе оптимальным является создание P-i-N-структуры [1]. Вызовом для технологов является осаждение низкоомного алмаза с N-типом проводимости. Обычно для этого используют легирование фосфором в процессе синтеза или графитизацию поверхности алмаза лазерным излучением.

Для создания электрических контактов алмазную поверхность металлизуют различными способами. Для правильного подбора материала выпрямляющего контакта, необходимо провести расчет работы выхода из слоя алмаза, легированного бором. Наши расчёты показывают, что работа выхода составляет 3,46 эВ. Согласно [2] работа выхода из никеля равна 5,3 эВ, из графита – 5 эВ, работа выхода из меди – 4,4 эВ.

На рисунке приведены вольтамперные характеристики (ВАХ) алмазного образца с содержанием азота и никеля, на одну из поверхностей которого был осажден медный контакт, который обычно был под нулевым потенциалом. Потенциальный игольчатый электрод позволял измерить ВАХ в различных областях образца. Измеренные ВАХ типичны для диода Шоттки (см. рис.). Высота барьера составляет 0,68 эВ, дифферен-

циальное сопротивление образца равно  $7 \cdot 10^{-6}$  Ом. Красная и черная кривые измерены в разных областях диода. Видно, что на ВАХ при обратном смещении в области 1 наблюдается развитие пробоя.

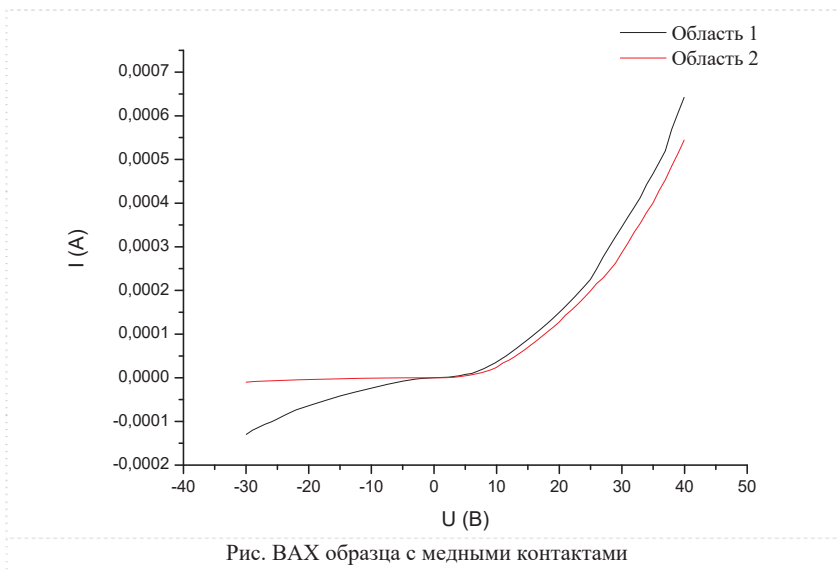


Рис. ВАХ образца с медными контактами

*Исследование было выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2020-0048.*

### Литература

1. А. Понятов, *Наука и жизнь*, № 5, 48–49 (2019).
2. С.М. Зи. Физика полупроводниковых приборов. В 2 кн. Кн. 1. Пер. с англ. 2-е перераб. и доп. изд. М.: Мир, 1984. 456 с.

## ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ДВУХФОТОННАЯ ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИЯ – СОЗДАНИЕ 3D МИКРОСТРУКТУР ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

А. Г. Витухновский<sup>1,2</sup>, Д. А. Колымагин<sup>2</sup>, А. В. Грициенко<sup>1,2</sup>,  
А. В. Писаренко<sup>2</sup>, А. И. Проходцов<sup>2,3</sup>, М. И. Данилкин<sup>1</sup>, Г. В. Прутсков<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН,  
Россия, г. Москва, [vitukhnovsky@mail.ru](mailto:vitukhnovsky@mail.ru)

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (национальный  
исследовательский университет), Россия, г. Долгопрудный

<sup>3</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,  
Россия, г. Москва

<sup>4</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
Россия, г. Москва

Стремительное развитие технологий в различных областях, таких как нанофотоника, оптоэлектроника, оптика, биомедицинская инженерия и биохимические системы, в последние годы является причиной формирования новых подходов созданию микрооптических устройств. Аддитивные технологии представляются крайне важными, в частности, технология DLW (Direct Laser Writing), которая позволяет создавать 3D объекты произвольной формы и дизайна с высоким пространственным разрешением. Технология DLW основана на двухфотонной фотополимеризации – явлении, при котором сфокусированное фемтосекундное излучение лазера инициирует реакцию полимеризации основного компонента фоточувствительной композиции – мономера, в малом объеме фотоконструкции (т. е. вокселе) благодаря эффекту двухфотонного поглощения в фотоинициаторе [1].

В докладе предполагается рассмотрение DLW-метода для различных оптических приложений: создание элементов фотонных интегральных схем (PIC-Photonic Integrated Circuits) [2], создание и исследование с помощью лазерной сканирующей микроскопии нового поколения микрооптических устройств – массивов микролинз (MLA – Micro Lens Array), создание элементов рентгеновской оптики для применения в синхротронных исследованиях [3], создание и исследования фотонных «проводов» (PWB-Photonic Wire Bonds) в сочетании с источниками одиночных (фокковских) фотонов (SPE – Single Photon Emitters) и оптическими резонаторами [4].

### Литература

1. K. Satoshi, S. Hong-Bo, T. Tomokazu, T. Kenji, *Nature*, 412, 697–698 (2001).
2. R.P. Matital, D.A. Kolymagin, D.A. Chubich, D.D. Merkushev, A.G. Vitukhnovsky, *J. Sci. Adv. Mater. Devices*, 7(2), 100413 (2022).
3. A.E. Egorov, A.A. Kostyukov, D.A. Shcherbakov, D.A. Kolymagin, D.A. Chubich, R.P. Matital, M.V. Arsenyev, I.D. Burtsev, M.G. Mestergazi, E.R. Zhigashina, S.A. Chesnokov, A.G. Vitukhnovsky, V.A. Kuzmin, *Polymers*, 15(1), 71 (2023).
4. A.V. Gritsienko, A. Duleba, M.V. Pugachev, N.S. Kurochkin, I.I. Vlasov, A.G. Vitukhnovsky, A.Y. Kuntsevich, *Nanomaterials*, 12(24), 4495 (2022).

## ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ФОНОННЫХ КОМПОНЕНТ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В БЕСПРИМЕСНОМ АЛМАЗЕ

Д. С. Войтенко<sup>1</sup>, Е. И. Липатов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Россия, г. Томск, [dmitry.voytenko.02@gmail.com](mailto:dmitry.voytenko.02@gmail.com)

<sup>2</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, г. Томск

В настоящее время в электронике и фотонике идет поиск новых материалов для повышения эффективности работы устройств. Одним из таких материалов является алмаз, его уникальные свойства могут найти применение в создании перспективных приборов оптоэлектроники. Помимо высокой стойкости к температурам, радиационному излучению и механическим напряжениям, также отмечают его качественные энергетические параметры: большая ширина запрещенной зоны, высокая подвижность носителей заряда и их малое время жизни, большая энергия связи (порядка 80 мэВ).

В силу последних свойств свободные экситоны в алмазе могут формироваться при комнатной температуре. С дальнейшим ее понижением экситонный газ конденсируется, образуя различные экситонные комплексы, которые могут образовывать капли электронно-дырочной жидкости. В условиях существования данной жидкости возможно усиление фототока. Эксперименты по исследованию конденсата свободных экситонов проводились для таких полупроводников как Ge, Si, GaAs [1]. Наступившая, с недавних пор, доступность производства беспримесных синтетических алмазов позволяет расширить исследования для широкозонных материалов. Эффект усиления фототока может найти свое применение в углеродной электронике и фотонике, при создании СВЧ и КВЧ транзисторов, PIN диодов, оптических коммутаторов больших мощностей.

В настоящей работе исследованы спектры фотолюминесценции и их декомпозиция на фононные компоненты. Для ее возбуждения использовался KtCl-лазер с длиной волны лазерного излучения  $\lambda = 222$  нм, длительность импульса на полувысоте 10 нс, частота следования 1 Гц. Максимальная плотность мощности на поверхности образца составила 15 МВт/см<sup>2</sup>. Было обнаружено, что спектральные компоненты испытывали избыточное над температурным уширение.

*Исследование было выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2020-0048.*

### Литература

1. Л.В. Келдыш, П. Вашишта, Р.К. Калиа и др. Электронно-дырочные капли в полупроводниках. М.: Наука, 1988. 468 с.

## ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛ-ОКСИДНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ ZnO-Ag, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

А. В. Волокитина, Д. А. Гончарова, В. А. Светличный

*Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Россия, г. Томск, [nvv0404@gmail.com](mailto:nvv0404@gmail.com)*

Фотокатализ – это экологически чистая, безопасная и многообещающая технология разложения многих органических и неорганических загрязнителей воды и воздуха. Для его успешного применения существует необходимость создания новых фотокаталитических наноструктур. Метод импульсной лазерной абляции (ИЛА) применяется как современный, недорогой, достаточно простой и экологичный метод получения сложных композитных наноматериалов. Этим методом могут быть осуществлены синтез и модификация фотокатализаторов на основе различных оксидных наноструктур, проявляющие активность выше активности наноматериалов синтезированных другими способами.

В настоящей работе фотокатализаторы на основе оксида цинка допированные НЧ серебра были получены методом ИЛА в воде. Для этого коллоидные растворы НЧ ZnO и НЧ Ag синтезировались с использованием Nd:YAG лазера (1064 нм, 20 Гц, 7 нс, 150 мДж) и смешивались с разным процентным содержанием серебра от 0,1–1 масс. %. Половина смешанного раствора подвергалась дополнительному облучению тем же лазерным источником. Полученные коллоидные системы ZnO-Ag были высушены и прокалены в течение 4 ч при температуре 400 °С. Структура полученных фотокатализаторов рассматривалась различными физико-химическими методами исследования. Фотокаталитическая активность полученных катализаторов тестировалась на модельном органическом красителе родамине Б. Также фотоактивация антибактериальной активности полученных систем была оценена против бактерии *S.aureus*.

В результате было показано, что введение серебра, а также дополнительная лазерная обработка коллоидов способствует увеличению фотокаталитической и фотоактивации антибактериальной активности образцов. Дополнительно обработанные системы ZnO-Ag остаются стабильными при провидении нескольких циклов фотокатализа.

*Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).*

## ВЛИЯНИЕ СТОЛКНОВЕНИЙ НА ХАРАКТЕР ЭФФЕКТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ В ЯЧЕЙКАХ КОНЕЧНЫХ ПРОДОЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ С АНТИРЕЛАКСАЦИОННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ СТЕНОК

Г. В. Волошин, Хуэй Мэн, И. М. Соколов, А. С. Курапцев

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Россия, г. Санкт-Петербург, [odo@spbstu.ru](mailto:odo@spbstu.ru)*

Практический интерес эффекта электромагнитно-индуцированной прозрачности [1; 2] во многом обусловлен узостью линии прозрачности по сравнению с шириной естественной линии поглощения. Негативным фактором для практических приложений здесь являются столкновения атомов со стенками ячейки и между собой. Столкновения уменьшают время когерентного взаимодействия атомов с полем, вследствие чего изменяется скорость распада наведенных полем атомных когерентностей и ширина резонанса прозрачности увеличивается. Одним из способов борьбы с этим является использование специальных антирелаксационных покрытий, позволяющих увеличить время жизни когерентностей. Целью данной работы является теоретическое исследование влияния столкновений атомов со стенками с различными типами покрытий на форму резонанса электромагнитно-индуцированной прозрачности. В основе математической модели описания состояний атомного ансамбля лежит метод односторонней матрицы плотностей в представлении Вигнера. Наличие стенок учитывается введением граничных условий различных типов. Использование ряда приближений позволяет получить аналитические выражения для резонансных контуров восприимчивости. В результате проанализировано изменение формы резонанса электромагнитно-индуцированной прозрачности при варьировании параметров среды и лазерной накачки для различных типов покрытий. Кроме того, предлагается альтернативное данному в работах [3; 4] физическое объяснение различия Стоксовского и анти-Стоксовского каналов рассеяния пробного излучения в терминах одетых состояний.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (грант «Leader» № 21-1-1-36-1), а также Российского научного фонда (грант № 21-72-10004).*

### Литература

1. S.E. Harris, J.E. Field, A. Imamoglu, *Phys. Rev. Lett.*, 64, 1107–1110 (1990).
2. K.J. Boller, A. Imamoglu, S.E. Harris, *Phys. Rev. Lett.*, 66, 2593–2596 (1991).
3. Г.В. Волошин, Х. Мэн, А.С. Курапцев, И.М. Соколов, *ЖЭТФ*, 162(3(9)), 313–321 (2022).
4. Я.А. Фофанов, И.М. Соколов, *ЖЭТФ*, 162(3(9)), 297–306 (2022).



## СРАВНЕНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В АЛЮМИНИЙ И ГЕРМАНИЙ СОДЕРЖАЩИХ СТЕКЛЯННЫХ МАТЕРИАЛАХ

Л. И. Вострикова<sup>1,2</sup>, И. А. Карташов<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,  
Россия, г. Новосибирск, [vostrik@isp.nsc.ru](mailto:vostrik@isp.nsc.ru)

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет экономики и управления,  
Россия, г. Новосибирск

<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
Россия, г. Новосибирск

В работе представлены сравнительные данные результатов исследований нелинейного преобразования частоты импульсного лазерного излучения с генерацией второй гармоники (ГВГ) на фотоинтегрируемых методом оптического полинга микропериодных решётках поляризуемости второго порядка [1–3] в алюминий и германий содержащих стеклянных материалах с силикатной матрицей. Замечено существенное влияние вкраплений малых концентраций азота и фосфора, а также редкоземельных элементов. Максимальная эффективность преобразования в силикатных образцах остаётся на два-три порядка меньше, чем в нелинейно-оптических кристаллах. Но это может быть связано с изменениями в микроскопике протекающих процессов при формировании решётки нелинейной поляризуемости (рис.). Возможные механизмы обсуждаются.



Рис. ГВГ при разной мощности полинующего излучения  $\lambda = 532$  нм

Работа выполнена в рамках Госзадания FWGW-2021-0012.

### Литература

1. D.D. Hickstein, D.R. Carlson, H. Mundoor, J.B. Khurgin, K. Srinivasan, D. Westly, A. Kowligy, I.I. Smalyukh, S.A. Diddams, S.B. Papp, *Nat. Photonics*, 13, 494–499 (2019).
2. L.I. Vostrikova, V.A. Smirnov, *Proc. SPIE*, 12193, 1219307 (2022).
3. Л.И. Вострикова, В.А. Смирнов, *Изв. РАН. Сер. физ.*, 79(2), 198–202 (2015).

## ОПТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ СКРУЧЕННЫХ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ БЛИЖНЕПОЛЬНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

Е. С. Вяткин, А. В. Пошакинский, С. А. Тарасенко

*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН,  
Россия, г. Санкт-Петербург, [egor.vyatkin@bk.ru](mailto:egor.vyatkin@bk.ru)*

Искусственные киральные наноструктуры активно исследуются в последние десятилетия. В нанофотонике они могут быть использованы, например, для реализации источников циркулярно поляризованного света [1]. Одним из популярных типов киральных фотонных структур являются скрученные стеки двумерных материалов, свойствами которых можно управлять, варьируя угол скручивания [2; 3].

В данной работе построена теория оптической активности в системе, состоящей из двух диэлектрических слоев, расположенных на расстоянии  $d$  и повернутых друг относительно друга на угол  $\varphi$ . Диэлектрическая проницаемость каждого слоя предполагается периодически модулированной в форме квадратной решетки с периодом, меньшим чем длина волны света. Изолированный слой обладает изотропным оптическим откликом – при прохождении через него плоской волны ее поляризация не меняется. При сближении пары слоев они начинают взаимодействовать через свои ближние поля, представляющие собой дифрагированные эванисцентные волны, что приводит к появлению оптической активности и циркулярного дихроизма. Данные эффекты наиболее выражены при углах скручивания близких к  $30^\circ$  и  $60^\circ$  и дополнительно усиливаются на частотах собственных волноводных мод системы.

Интерференция пространственной модуляции диэлектрической проницаемости в двух слоях приводит к появлению муара. За счет рассеяния на муаре могут возникать дифрагированные на малый угол лучи, которые также обладают частичной циркулярной поляризацией. Интерференция опорного и дифрагированных лучей приводит к осцилляциям степени циркулярной поляризации света в плоскости слоев.

### Литература

1. S.V. Lobanov, S.G. Tikhodeev, N.A. Gippius, A.A. Maksimov, E.V. Filatov, I.I. Tartakovskii, V.D. Kulakovskii, T. Weiss, C. Schneider, J. Geßler, M. Kamp, S. Höfling, *Phys. Rev. B*, 92(20), 205309 (2015).
2. A.V. Poshakinskiy, D.R. Kazanov, T.V. Shubina, S.A. Tarasenko, *Nanophotonics*, 7(4), 753–762 (2018).
3. B. Lou, N. Zhao, M. Minkov, C. Guo, M. Orenstein, S. Fan, *Phys. Rev. Lett.*, 126, 136101 (2021).

## ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КВАРЦЕВЫХ СТЕКОЛ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ПРИРОДНЫХ КВАРЦИТОВ

Т. Ю. Гармышева, А. И. Непомнящих, Р. Ю. Шендрик,  
А. С. Паклин, А. А. Шалаев

*Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН  
Россия, г. Иркутск, [tatyanasiz85@yandex.ru](mailto:tatyanasiz85@yandex.ru)*

Природное кварцевое сырье является главным источником получения высокочистых кварцевых концентратов для производства прозрачного кварцевого стекла и кварцевой керамики. От химического состава исходного кварцевого материала и характера ближайшего окружения примесей зависят спектральные характеристики, в частности люминесценция кварцевого стекла. Так, например, примеси алюминия и германия, которые практически всегда присутствуют в природных кварцитах, способствуют созданию большого числа кислородно-дефицитных (ОДЦ) центров, которые вовлечены в процессы рекомбинационной люминесценции в кварцевом стекле [1].

Оптические характеристики кварцевого стекла зависят как от качества кварцевых концентратов, так и от структуры стекла. Стекла, синтезированные из химически обогащённых кварцевых концентратов, прошедших процесс кристобалитизации и из кварцевых концентратов, не прошедших такую процедуру, обладают рядом отличий. Ранее [2] нами были обнаружены ощутимые различия и в полосах оптического поглощения и люминесценции точечных дефектов в таких стеклах. В этой связи вопрос о структурных различиях и особенностях стекол, полученных из разных кристаллических модификаций  $\text{SiO}_2$ , приобретает большую практическую значимость. В докладе рассматривается люминесценция кварцевых стекол, полученных из кварца и из кристобалита. Рассмотрена роль кислородно-дефицитных (Ge-ОДЦ) центров в процессе люминесценции кварцевых стекол, активированных ионами редкоземельных элементов (Ce, Eu).

### Литература

1. A.N. Trukhin, A. Boukenter, Y. Ouerdane, S. Girard, *J. Non-Cryst. Solids*, 357(16-17), 3288–3291 (2011).
2. T. Garmysheva, A.I. Nepomnyashchikh, A. Shalaev, E. Kaneva, A. Paklin, K. Chernenko, A.P. Kozlova, V. Pankratov, R. Shendrik, *J. Non-Cryst. Solids*, 575, 121199 (2022).

## ЛАЗЕРЫ НА NV-ЦЕНТРАХ В АЛМАЗЕ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Д. Е. Генин<sup>1</sup>, Е. И. Липатов<sup>1,2</sup>, И. В. Измайлов<sup>1</sup>, В. Г. Винс<sup>3</sup>,  
А. П. Елисеев<sup>4</sup>, А. Д. Саввин<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Россия, г. Томск, [dm\\_genin@ytomske.ru](mailto:dm_genin@ytomske.ru)*

<sup>2</sup>*Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, г. Томск  
<sup>3</sup>ООО «Велман», Россия, г. Новосибирск*

<sup>4</sup>*Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН  
Россия, г. Новосибирск*

<sup>5</sup>*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики  
им. Н. Л. Духова, Россия, г. Москва*

Алмаз является перспективным материалом для приборов электроники и фотоники. Это связано с его большой твёрдостью, высокой теплопроводностью, большими значениями подвижности носителей зарядов обоих знаков, а также высокой радиационной стойкостью. Также он обладает низким коэффициентом температурного расширения, что вместе с указанными выше свойствами делает его перспективным материалом для создания активных элементов лазеров.

Алмаз может содержать большое количество примесно-дефектных центров, значительная часть которых является центрами окраски. Одним из наиболее изученных, и в то же время интересных центров окраски является центр «азот-вакансия» (NV-центр). В отрицательном зарядовом состоянии (NV<sup>-</sup>) в спектре люминесценции он, как правило, демонстрирует бесфонную линию (БФЛ) на длине волны 637 нм и так называемое фоновное крыло, простирающееся вплоть до значений длин волн 850 нм. Существует множество работ по использованию NV-центров в различных сенсорах: гироскопах, магнитометрах, термометрах, акселерометрах и т. п. Во всех них используется люминесценция NV-центров. Использование лазерного излучения вместо спонтанного открывает широкие перспективы в области квантовых сенсоров на основе алмаза.

Впервые генерация на NV-центрах была получена в [1]. В настоящем докладе приводятся последние результаты, полученные в области развития лазеров на NV-центрах в алмазе, в том числе нашей группой. Обсуждаются перспективы развития данного направления.

*Исследование было выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSWM-2020-0048.*

### Литература

1. A. Savvin, A. Dormidonov, E. Smetanina, V. Mitrokhin, E. Lipatov, D. Genin, S. Potanin, A. Yelisseyev, V. Vins, *Nat. Commun.*, 12, 7118 (2021).

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ ДИНАМИКА СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА НА NV-ЦЕНТРАХ В АЛМАЗЕ

А. В. Самолов<sup>1</sup>, Д. Е. Генин<sup>1</sup>, Е. И. Липатов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г. Томск, [dm\\_genin@vtomske.ru](mailto:dm_genin@vtomske.ru)

<sup>2</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, г. Томск

Алмаз обладает большой твёрдостью, высокой теплопроводностью и низким коэффициентом температурного расширения, что делает его перспективным материалом для создания активных элементов лазеров.

В работе [1] впервые была получена лазерная генерация на NV-центрах. Генерация происходила при накачке импульсным Nd:YAG-лазером в полосе с центром на 720 нм.

Дальнейшие исследования показали, что для разных алмазных образцов центр полосы генерации может находиться в диапазоне от 714 до 720 нм, а ширина полосы на полувысоте может меняться от 6 до 15–20 нм. Также в предварительных экспериментах было зафиксировано, что при охлаждении образца уже при температурах порядка 240 К наблюдается распад полосы генерации на две полосы с неравной амплитудой. Настоящий доклад посвящён попытке подробного исследования данного феномена. Исследовалось изменение спектров лазерной генерации нескольких алмазных образцов, содержащих NV-центры, при изменении температуры в диапазоне от комнатной до примерно 80 К. Генерация происходила в режиме сверхсветимости, т. е. обратная связь осуществлялась только за счёт френелевского отражения от граней кристалла.

*Исследование было выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSWM-2020-0048.*

### Литература

1. A. Savvin, A. Dormidonov, E. Smetanina, V. Mitrokhin, E. Lipatov, D. Genin, S. Potanin, A. Yelisseeyev, V. Vins, *Nat. Commun.*, 12, 7118 (2021).

## ВЛИЯНИЕ ГАЛОГЕНИД-ИОНОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ КРАСИТЕЛЕЙ

М. А. Герасимова

*Сибирский федеральный университет,  
Россия, г. Красноярск, [marina\\_2506@mail.ru](mailto:marina_2506@mail.ru)*

Изменение люминесцентных свойств органических красителей ксантенового ряда в зависимости от их микроокружения дает возможность применения их в качестве зондов и сенсоров в разных биомедицинских приложениях, а также в качестве стандартов при измерении флуоресцентных времен жизни и квантового выхода. В настоящей работе исследовано влияние галогенид-ионов ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$ ) на эффективность люминесценции флуоресцеина и его бром-замещенного аналога (эозина Y) методами время-разрешенной и стационарной спектроскопии.

Полученные кривые затухания показывают перераспределение времен жизни между двумя компонентами и падение среднего времени жизни каждого красителя с ростом концентрации йодид-ионов. При добавлении  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Br}^-$  не выявлено никаких изменений как спектральных, так и фотофизических свойств красителей.

Квантовый выход флуоресценции исследуемых соединений был найден как отношение экспериментально измеренного времени жизни и радиационного времени жизни, рассчитанного на основе стационарных спектров поглощения и испускания. Показано, что введение  $\text{I}^-$  приводит к уменьшению квантового выхода в 4 раза для флуоресцеина и лишь на 40 % для эозина.

Найденная константа  $ST$ -конверсии флуоресцеина увеличивается на два порядка при добавлении  $\text{I}^-$  концентрацией 0,25 М и достигает значения для эозина Y в отсутствие добавок. В то же время константа скорости  $ST$ -конверсии самого эозина увеличивается менее чем в 2 раза. Это говорит о том, что уже содержащийся внутренний бром в структуре эозина Y препятствует перераспределению излучательных и безызлучательных каналов релаксации люминесцентного состояния при введении внешнего йодид-иона.

Построенные зависимости Штерна – Фольмера являются линейными, что говорит о столкновительном механизме тушения. Результаты работы показывают, что флуоресцеин можно применять как индикатор наличия тяжелых ионов в водных средах.

*Работа выполнена в рамках программы «Приоритет 2023», проект «Создание новых люминесцентных материалов полифункционального назначения».*

## СИНТЕЗ И ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТОВ $\beta\text{-Bi}_2\text{O}_3/\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ , ПОЛУЧЕННЫХ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИЕЙ

А. Г. Голубовская, В. А. Светличный

*Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Россия, г. Томск, [aleksandra.golubovskaya@mail.ru](mailto:aleksandra.golubovskaya@mail.ru)*

На сегодняшний день актуальна задача развития лазерных методов синтеза фотокатализаторов для разложения или окисления органических соединений, а также генерации водорода. Импульсной лазерной абляцией (ИЛА) твердых мишеней, как в жидкости, так и в газе, возможно получать уникальные наночастицы (НЧ) с нужными свойствами, а также сложные наноконпозиты (НК). Среди большого выбора фотокатализаторов важное место занимают полупроводники на основе висмута, в частности  $\beta\text{-Bi}_2\text{O}_3$  и  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ , которые обладают хорошей фотокаталитической (ФК) активностью, а также поглощают в видимой области спектра. Создание НК на основе этих материалов может привести к формированию гетероперехода II типа, что значительно улучшит ФК свойства.

В данной работе НК  $\beta\text{-Bi}_2\text{O}_3/\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  были получены при активации смеси отдельных соединений, синтезированных ИЛА в воде и воздухе при использовании Nd:YAG лазера (1064 нм, 20 Гц, 7 нс). Для синтеза НЧ  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  производилась абляция мишеней Bi и Si в дистиллированной воде, после чего коллоидные растворы смешивались в атомном соотношении Bi:Si = 12:1. Затем смесь подвергалась дополнительной лазерной обработке для стимуляции взаимодействия между частицами. Облученный раствор сушили на воздухе и отжигали при 600°C. Синтез НЧ  $\beta\text{-Bi}_2\text{O}_3$  производился ИЛА мишени Bi в атмосферном воздухе. Далее из смеси двух порошков механоактивацией был получен ряд НК  $\beta\text{-Bi}_2\text{O}_3/\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  с различным соотношением компонентов.

Проведен анализ морфологии, состава, удельной поверхности и оптических свойств полученных НК. Оценена ФК активность образцов в реакции разложения водного раствора красителя Родамина Б и селективного фотоокисления 5-гидроксиметилфурфурола при облучении LED с различной длиной волны. Установлено, что скорость разложения увеличивается в присутствии НК  $\beta\text{-Bi}_2\text{O}_3/\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ , по сравнению с индивидуальными оксидом ( $\beta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ ) и силикатом ( $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ) висмута, что может быть связано с формированием гетероструктуры с гетеропереходом II типа.

*Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 19-73-30026).*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В СРЕДЕ ФЕМАР

О. В. Горева, О. Л. Никонович, М. А. Дудаев, Р. Н. Баданов

*Иркутский государственный университет путей сообщения,  
Россия, г. Иркутск, [goreva\\_ov@irgups.ru](mailto:goreva_ov@irgups.ru)*

В работе представлено моделирование оптических и нелинейно-оптических свойств органических молекул молекулярного кристалла, основанное на решении уравнения колебаний квантовой системы под действием внешнего электромагнитного поля световой волны в среде Femar, предназначенного для проведения инженерного анализа методом конечных элементов. В представленном подходе к моделированию свойств квантовой системы органическая молекула рассматривается как система сосредоточенных масс, связанных между собой упругими связями определённой жёсткости. При этом энергия связи между атомами в молекуле представлена как энергия упругой связи между сосредоточенными массами, значения которых ассоциируются с эффективными массами валентных электронов, преимущественно локализованных на определённом атоме. Используя рентгеноструктурные данные молекулярного кристалла, его состав и энергию связи атомов в молекуле были получены матрицы масс и жёсткостей для моделируемой квантовой системы. После переноса структурных параметров, матриц масс и жёсткостей в «решатель» среды Femar и введения параметров вынуждающей силы, действующей на данную колебательную систему, ассоциированную с полем световой волны, получены данные о величине и направлении смещения каждой точечной массы в зависимости от длины волны, действующего светового поля, для различных собственных частот колебательной системы. При этом величина смещения сосредоточенной массы ассоциируется с вероятностью перехода электрона, локализованного на определённом атоме, в возбуждённое состояние под действием заданного светового поля. В зависимости от порядка собственной частоты колебательной системы под действием внешнего светового поля моделируется смещение узлов колебательной системы, т. е. вероятность электронных переходов при линейном и нелинейном отклике колебательной системы. Моделирование оптических и нелинейно-оптических свойств было проведено для широко известного нелинейного молекулярного кристалла метанитроанилин, а также для молекулярного кристалла этионамида. Для кристалла метанитроанилин смоделированы спектры поглощения, а также рассчитаны значения компонент тензора нелинейной восприимчивости, которые хорошо согласуются с литературными данными. Для кристалла этионамида смоделированы оптические спектры поглощения, установлена природа его полос поглощения. Полученные данные хорошо согласуются с экспериментальными результатами и результатами моделирования, полученными ранее на ос-



нове квантово-механических расчётов [1]. Также получены значения компонент тензора нелинейной восприимчивости кристалла этионамида.

### Литература

1. О.Л. Никонович, А.И. Илларионов, Е.А. Илларионова, А.А. Старченко, *Изв. вузов. Физика*, 54(2/2), 232–236 (2011).

## НЕЛИНЕЙНОЕ ФЕМТОСЕКУНДНОЕ ЛАЗЕРНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ СОБСТВЕННОЙ И ПРИМЕСНОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КРИСТАЛЛОВ

В. И. Барышников, О. В. Горева, Т. А. Колесникова,  
О. Л. Никонович, Ю. А. Мурзина

*Иркутский государственный университет путей сообщения  
Россия, г. Иркутск, [goreva\\_ov@irgups.ru](mailto:goreva_ov@irgups.ru)*

При возбуждении номинальной чистоты (уровень примесей  $< 10^{-5}$  вес. %) кристаллов  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{YAlO}_3$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_4$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{YAlO}_3$ ;  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ;  $\text{YLiF}_4$ ;  $\text{LiLuF}_4$ ,  $\text{NaI}$ ,  $\text{CsI}$  и др. интенсивным фемтосекундным ( $2\omega$ :Ti:Sp; 360–390 нм; 1–15 МВт/см<sup>2</sup>; 80 МГц; 50 фс) лазерным излучением наблюдается интенсивная фотолюминесценция (ФЛ). Спектры и кинетика затухания ФЛ показали, что в  $\text{Al}_2\text{O}_3$  это примесь Ti, Cr, V; в  $\text{YAlO}_3$  – Ti, Ce, Pr;  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  – Nd, Ce, Pr и др.

Установлено, что выход ФЛ  $\text{Ce}^{3+}$ , Cr,  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Ti}^{3+}$  имеет кубическую зависимость от интенсивности фемтосекундного лазерного воздействия. Полученные результаты указывают на трехфотонный механизм возбуждения перечисленных ионов в соответствующих кристаллах. Зависимость импульсной фотопроводимости кристаллов  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{YAlO}_3$  и  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  от интенсивности фемтосекундного лазерного возбуждения на длине волны 360 нм тоже имеет кубическую зависимость. Данные результаты позволяют считать, что процесс возбуждения ФЛ происходит путем последовательного захвата наведенных зонных дырок и электронов по механизму трехфотонной ионизации собственного вещества кристаллов.

Под воздействием фемтосекундных лазерных импульсов при трехфотонной ионизации собственного вещества кристаллов наблюдается малоинерционная (100 фс) не зависящая от температуры (78–1200 К) собственная широкополосная ФЛ, как излучательные переходы электронов в  $2p\text{O}^{-2}$  верхней валентной зоне. Валентная  $2p\text{O}^{-2}$  ФЛ в  $\text{Al}_2\text{O}_3$  имеет полосу при 390 нм,  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  на 370 нм,  $\text{YAlO}_3$  – 380 нм.

В данной группе кристаллов с увеличением плотности мощности фемтосекундных импульсов ( $> 8$  МВт/см<sup>2</sup>) следующих с частотой 80 МГц обнаружен эффект насыщения интенсивности ФЛ примесей. Это связано с заселением электронами возбужденных уровней примесей, где время их жизни превышает период следования фемтосекундных импульсов. В таких же условиях эксперимента выход валентной  $2p\text{O}^{-2}$  ФЛ возрастает с ростом вероятности трехфотонной ионизацией собственного вещества.

## ФОТОСТАБИЛЬНОСТЬ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК $\text{Ag}_2\text{S}$ В ПРИСУТСТВИИ ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ $\text{Au}$

И. Г. Гревцева, О. В. Овчинников, М. С. Смирнов,  
С. В. Асланов, М. С. Асташкина

*Воронежский государственный университет  
Россия, г. Воронеж, [grevtseva\\_ig@inbox.ru](mailto:grevtseva_ig@inbox.ru)*

В данной работе представлены результаты исследований стабильности интенсивности люминесценции коллоидных квантовых точек  $\text{Ag}_2\text{S}$  (КТ  $\text{Ag}_2\text{S}$ ) в присутствии плазмонных наночастиц  $\text{Au}$  (НЧ  $\text{Au}$ ) под действием возбуждающего излучения с длиной волны 462 нм и мощностью 100 мВт. Исследуемые плазмон-экситонные (плекситонные) наноструктуры обладают эффективным поглощением и фотолюминесценцией в области 500–800 нм, приходящейся на область прозрачности биотканей, и являются перспективными материалами для приложений люминесцентного маркирования биообъектов. При этом управление квантовым выходом и фотостабильностью люминесценции таких плекситонных наноструктур является ключевым фактором, определяющим перспективу и возможность их практического применения в указанных приложениях нанопотоники [1].

Исследуемые плекситонные наноструктуры были получены в рамках водной методики синтеза. При этом коллоидные КТ  $\text{Ag}_2\text{S}$  были покрыты оболочкой из  $\text{SiO}_2$  толщиной 1,5 нм с последующей ее функционализацией положительными  $\text{NH}_2$ -группами, обеспечивающими направленное декорирование интерфейсов КТ  $\text{Ag}_2\text{S}$  плазмонными НЧ  $\text{Au}$  (2–3 нм). Подробная методика синтеза представлена в работе [2].

Декорирование поверхности КТ  $\text{Ag}_2\text{S}$  плазмонными НЧ  $\text{Au}$  обеспечивает 10-кратное увеличение квантового выхода люминесценции в области 750 нм. Однако при этом наблюдается стремительная деградация интенсивности свечения до 90 % при воздействии возбуждающего излучения, которая сопровождается выпадением коллоидного раствора плекситонных наноструктур в осадок. Нарушение коллоидной стабильности раствора является следствием разрушения плекситонных наноструктур под действием возбуждающих квантов. В подтверждение этого указывает снижение степени фотодегradации интенсивности свечения до 30 % за счет инкапсуляции плекситонных наноструктур в оболочку  $\text{SiO}_2$  толщиной 2 нм.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-3746.2022.1.2.*

### Литература

1. S. Kargozar, S.J. Hoseini, P.B. Milan, S. Hooshmand, H.W. Kim, M. Mozafari, *Biotechnol J.*, 15(12), 2000117 (2020).
2. И.Г. Гревцева, О.В. Овчинников, М.С. Смирнов, Т.С. Кондратенко, А.С. Перепелюха, А.М.Х. Хуссейн, *Опт. и спектр.*, 130(3), 455–460 (2022).

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РУДНОГО КОНЦЕНТРАТА БУРУН-НАРЫНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Я. И. Григоров<sup>1,2</sup>, Е. Ф. Мартынович<sup>1,2</sup>, А. А. Тютрин<sup>1,2</sup>, А. Л. Ракевич<sup>1</sup>,  
М. Е. Шульгина<sup>3</sup>, С. А. Прокопьев<sup>3</sup>, Б. С. Данилов<sup>3</sup>, Д. П. Гладкочуб<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН,  
Россия, г. Иркутск, [crevedcko.1@gmail.com](mailto:crevedcko.1@gmail.com)*

<sup>2</sup>*Иркутский государственный университет, Россия, г. Иркутск*

<sup>3</sup>*Институт земной коры СО РАН, Россия, г. Иркутск*

В современной промышленности вольфрам занимает очень важное место и является стратегическим ресурсом. Он используется как легирующая добавка к сталям и компонент некоторых других особо прочных и химически стойких сплавов, как правило, на основе карбида вольфрама. Жаропрочный, температура плавления 3280 °С [1], и химически стойкий, при комнатной температуре окисляется только царской водкой и смесью азотной и плавиковой кислот [2], материал. Вольфраму было найдено множество применений, начиная от ламп накаливания в быту и заканчивая химической, горнодобывающей и многими другими промышленностями. Поэтому исследования, связанные с источниками этого ресурса крайне важны. Были измерены спектры люминесценции большого числа зерен (частиц) вольфрамового концентрата. Была проведена механическая сепарация с использованием люминесцентных методов. Далее эти частицы были исследованы методами конфокальной сканирующей люминесцентной микроспектроскопии с временным разрешением и микроспектроскопии комбинационного рассеяния света. Благодаря комбинационному рассеянию, удалось установить какие минералы в концентрате присутствовали, а благодаря люминесцентному анализу удалось определить некоторые примеси.

Была взята случайная выборка 45 зерен концентрата и проведен их анализ. В этой выборке присутствовали: шеелит ( $\text{CaWO}_4$ ) + гюбнерит ( $\text{MnWO}_4$ ) – 16, флюорит ( $\text{CaF}_2$ ) – 8, рутил ( $\text{TiO}_2$ ) – 4, апатиты ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$ ) – 3, циркон ( $\text{ZrSiO}_4$ ) – 2, пирит ( $\text{FeS}_2$ ) – 2, барит ( $\text{BaSO}_4$ ) – 2, титанит ( $\text{CaTiSiO}_5$ ) – 1, ярозит ( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ) – 1, анатаз ( $\text{TiO}_2$ ) – 1, микроклин ( $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ ) – 1, кварц ( $\text{SiO}_2$ ) – 1, корунд ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) – 1, неопознанных – 2. Процент числа частиц, относящихся к минералам вольфрама – 36 %. что соответствует независимому минералогическому анализу концентрата химическими методами.

*Работа поддержана научным проектом 0243-2021-0004 в рамках плана фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 г.*

### Литература

1. [http://www.metotech.ru/articles/art\\_volfram\\_1.pdf](http://www.metotech.ru/articles/art_volfram_1.pdf)
2. <https://hiddenshell.ru/volfram-svoistva-i-oblast-primeneniya-volfram-primenenie/>

## ВЛИЯНИЕ ЧИСЛОВОЙ АПЕРТУРЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ КАНАЛОВ В СИНТЕТИЧЕСКОМ АЛМАЗЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Ю. С. Гулина, Г. К. Красин, Е. В. Кузьмин, Ц. Чжу,  
С. И. Кудряшов

*Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН  
Россия, г. Москва, [gulinavs@lebedev.ru](mailto:gulinavs@lebedev.ru)*

Исследование параметров нелинейно-оптического объемного взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов с кристаллическими диэлектрическими материалами, в том числе с синтетическим алмазом, является областью, представляющей большой интерес в настоящее время, как со стороны фундаментальных аспектов физики твердого тела, так для решения прикладных задач. Известны исследования влияния длительности импульсов и поляризации лазерного излучения на критические мощности самофокусировки и начала филаментации, а также длину люминесцентных каналов, возникающих при фокусировке пико/фемтосекундных лазерных импульсов в объем натурального и синтетического алмаза, плавленого кварца и флюорита [1; 2]. В настоящем исследовании проведена оценка влияния числовой апертуры фокусирующей оптики на процесс формирования люминесцентных каналов в синтетическом алмазе под воздействием лазерных импульсов с длиной волны 1030 нм и длительностью 0,3 пс. Показано, что критическая мощность начала филаментации уменьшается с ростом числовой апертуры. При этом наблюдается уменьшение длины люминесцентных каналов для более высоких апертур, что связано с увеличением степени влияния геометрической фокусировки.

*Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 21-79-30063).*

### Литература

1. S.I. Kudryashov, P.A. Danilov, E.V. Kuzmin, Y.S. Gulina, A.E. Rupasov, G.K. Krasin, I.G. Zubarev, A.O. Levchenko, M.S. Kovalev, P.P. Pakholchuk, S.A. Ostrikov, A.A. Ionin, *Opt. Lett.*, 47(14), 3487–3490 (2022).
2. G.K. Krasin, Y.S. Gulina, E.V. Kuzmin, V.P. Martovitskii, S.I. Kudryashov, *Photonics*, 10(2), 106 (2023).

## УСТАНОВКА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

Е. И. Давыдов<sup>2</sup>, А. Ф. Петровский<sup>1</sup>, В. П. Дресвянский<sup>1,2</sup>,  
Е. Ф. Мартынович<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН, Россия, г. Иркутск

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, Россия, г. Иркутск,  
*Quantumjke2016@mail.ru*

Барьерный разряд – разряд в газовой среде, заполняющий промежуток между электродами, один или оба из которых покрыты диэлектриком. Данный тип разряда применяется во многих сферах, от разработки эксимерных ламп до медицинских приложений – обработка тканей, поверхностей различных материалов. Барьерный разряд может быть успешно использован для создания на поверхности прозрачных диэлектриков тонких слоев, содержащих центры люминесценции для различных научных и технологических приложений [1].

Простейшим примером БР-разрядника является плоская объемная конфигурация, в которой один из электродов покрыт слоем диэлектрика, представленная на рис. 1 [2].

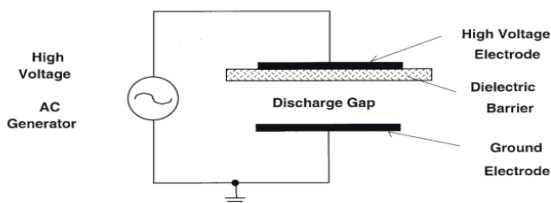


Рис. 1. Конфигурация для инициирования барьерного разряда [1]

Нами была разработана установка, ключевыми элементами которой являются: трансформаторы; формирователь импульсов с напряжением до 12 кВ; органы коммутации и узел перемещения барьеров. Блочная схема формирователя барьерного разряда представлена на рис. 2.

С помощью таймера (А5) формируются импульсы с частотой от 400 Гц до 4 кГц длительностью 20–200 микросекунд. Узел опторазвязки (А4) предназначен для разделения цепей таймера от высоковольтных цепей формирователя. Формирователь высоковольтных импульсов (А3) представляет собой усилитель с нагрузкой в виде импульсного трансформатора. На первичной обмотке формируются импульсы с амплитудой до 1000 В, амплитуда импульсов вторичной обмотки достигает 12 кВ. Питание формирователя (А3) обеспечивается от источника с выходным напряжением +40 В, питание таймера осуществляется стабилизированным источником +12 В.

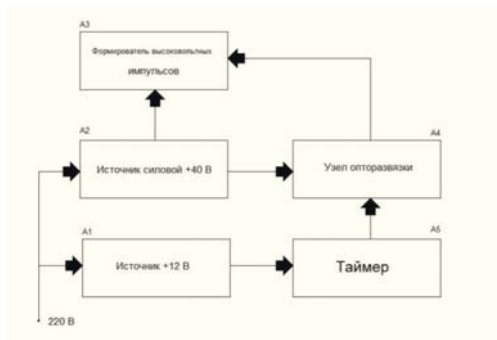


Рис. 2. Формирователь барьерного разряда:

A1 – источник +12 В; A2 – источник силовой +40 В; A3 – формирователь высоковольтных импульсов; A4 – узел опторазвязки; A5 – таймер

Для формирования БР, были использованы медные электроды разного диаметра: верхний (1 мм, 4 мм, и 8 мм) и нижний (8 мм и 14 мм). В качестве диэлектрика, были использованы: керамика ( $h = 3$  мм), текстолит ( $h = 1$  мм) и стеклотекстолит ( $h = 1,5$  мм). Выходное напряжение установки достигало  $U = 11$  кВ, длительность импульса  $\tau = 150$  мс. В процессе исследований было показано, что материал, из которого сделан диэлектрик, влияет на характеристики разряда.

*Работа выполнена в рамках плана фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 года (№ проекта 0243-2021-0004).*

## Литература

1. Е.В. Милютина, А.Ф. Петровский, А.Л. Ракевич, Е.Ф. Мартынович. Образование центров окраски в тонком слое кристаллов LiF под действием ВУФ-излучения барьерного разряда // Письма в ЖТФ, 2014, том 40, вып. 9.
2. Kogelschatz U. Filamentary, Patterned, and Diffuse Barrier Discharges // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. Vol. 30, N 4. P. 1400–1408.

## ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ УЛЬТРАТОНКИХ НАНОПЛАСТИН CdSe

Д. С. Дайбага<sup>1,2</sup>, А. В. Осадченко<sup>1,2</sup>, И. А. Захарчук<sup>1,2</sup>, А. С. Селюков<sup>1,2</sup>,  
С. А. Амброзевич<sup>1,2</sup>, М. Л. Скориков<sup>2</sup>, Р. Б. Васильев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет  
им. Н. Э. Баумана, Россия, г. Москва

<sup>2</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН  
Россия, г. Москва, [daibagya@mail.ru](mailto:daibagya@mail.ru)

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова  
Россия, г. Москва

На сегодняшний день в светодиодах наряду с органическими и металлоорганическими люминофорами используют наноструктуры различной геометрии [1; 2]. Это связано с тем, что варьирование размера наночастиц дает возможность управлять межзонной и рекомбинационной фотолюминесценцией (ФЛ). Данная работа посвящена изучению люминесцентных свойств нанопластин селенида кадмия, средняя толщина которых составляет 2,5 монослоя (МС).

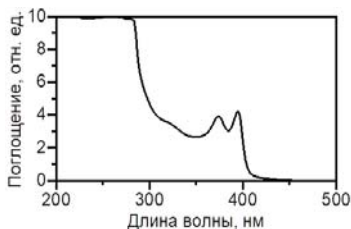


Рис. 1. Спектр поглощения наноструктур CdSe

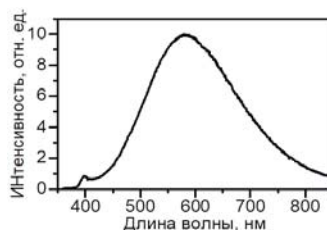


Рис. 2. Спектр люминесценции наноструктур CdSe

Наблюдаемые в спектре поглощения (рис. 1) полосы обусловлены переходами  $1S_{lh}-1S_e$  и  $1S_{hh}-1S_e$  между подзонами легких и тяжелых дырок в валентной зоне и зоной проводимости.

На рис. 2 представлен спектр ФЛ коллоидных нанопластин CdSe. Смещение полос поглощения и фотолюминесценции исследуемых нанопластин CdSe, средняя толщина которых составляет 2,5 МС в высокоэнергетическую область относительно более толстых нанокристаллов селенида кадмия [2] и объемного полупроводника CdSe [3] обусловлено квантово-размерным эффектом.

### Литература

1. A.A. Vashchenko, A.V. Osadchenko, A.S. Selyukov, S.A. Ambrozevich, I.A. Zakharchuk, D.S. Daibagya, O. Shliakhtun, N.Yu. Volodin, D.A. Cheptsov, S.M. Dolotov, V.F. Traven, *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 49, 74–77 (2022).
2. А.С. Селюков, А.Г. Витухновский, В.С. Лебедев, А.А. Ващенко, Р.Б. Васильев, М.С. Соколикowa, *ЖЭТФ*, 147(4), 687–701 (2015).
3. K.A. Magarian, V.V. Fedyanin, K.R. Karimullin, I.A. Vasilieva, G.V. Klimusheva, *J. Phys. Conf. Ser.*, 478(1), 012007 (2013).

## ФИЛАМЕНТАЦИЯ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ВИДИМОГО-БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА В ВОДЕ

П. А. Данилов<sup>1</sup>, Д. А. Помазкин<sup>1</sup>, И. Д. Матяев<sup>2</sup>, П. Я. Илюшин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Россия, г. Москва,  
[danilovpa@lebedev.ru](mailto:danilovpa@lebedev.ru)*

<sup>2</sup>*Московский государственный технический университет  
им. Н. Э. Баумана, Россия, г. Москва*

<sup>3</sup>*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова  
Россия, г. Москва*

Физические явления самофокусировки и филаментации лазерного излучения при распространении в различных средах известны уже более 60 лет [1]. Появление мощных пико- и фемтосекундных лазерных систем вызвало бурный рост исследований в данной области и открыло новые возможности для практических применений, в том числе и для формирования различных функциональных структур: фазовых волновых пластин, поляризационных элементов и оптической памяти [2]. Ключевым аспектом в этом случае является возможность управления параметрами запи-сывающего лазерного излучения (филамента) и достижения уникальных характеристик за счет пространственно-временной фокусировки, которая признана эффективным методом уменьшения нелинейной самофокуси-ровки, препятствующей достижению высокой пиковой интенсивности филаментов [3]. В представленной работе авторами проведены экспери-ментальные исследования важных характеристик монофиламентов в ди-стиллированной воде для широкого диапазона длин волн (0,35–2,7 мкм), таких как пороговая мощность образования, продольные и поперечные распределения интенсивности, плотность плазмы и энергии, критическая мощность самофокусировки. Полученные результаты вносят уникальный вклад в возможность интерпретации физических процессов, лежащих в основе нелинейно-оптического взаимодействия с веществом.

### Литература

1. Г.А. Аскарьян, *ЖЭТФ*, 42(6), 1567–1570 (1962).
2. S.S. Fedotov, R. Drevinskas, S.V. Lotarev, A.S. Lipatiev, M. Beresna, A. Čerkauskaitė, V.N. Sigaev, P.G. Kazansky, *Appl. Phys. Lett.*, 108(7), 071905 (2016).
3. K. Sugioka, Y. Cheng, *Light Sci Appl.*, 3(4), e149 (2014).



## ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТА ТАЛЬБОТА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СУПЕРПОЗИЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ РЕШЁТОК

Э. Ч. Дармаев<sup>1,2</sup>, Д. А. Иконников<sup>1</sup>, С. А. Мысливец<sup>1,2</sup>,  
В. Г. Архипкин<sup>1,2</sup>, А. М. Вьюнышев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН – обособленное подразделение  
ФИЦ КНЦ СО РАН, Россия, г. Красноярск, [e@darmaev.ru](mailto:e@darmaev.ru)

<sup>2</sup>Институт инженерной физики и радиоэлектроники,  
Сибирский федеральный университет, Россия, г. Красноярск

В настоящее время значительный интерес вызывают конфигурируемые световые поля, известные как «структурированный свет». Структурированный свет находит множество применений, например, в микроскопии [1], визуализации [2], фотолитографии [3], оптических манипуляциях [4] и других областях. Для расширения функциональных возможностей структурированного света полезно исследовать методы формирования световых полей с нетривиальным пространственным распределением. В данной работе исследуется применимость эффекта Тальбота для формирования оптических решёток на структурах, сформированных путем суперпозиции нескольких пространственных гармоник [5]. Для этого рассматривалась дифракция Френеля на рассматриваемых суперпозиционных решетках, в рамках которой полученные оптические решётки, как было показано, имеют пространственную периодичность вдоль оси распространения, что указывает на проявление эффекта Тальбота для исследуемых структур. Помимо расчётов также был проведён эксперимент, в котором пучок гелий-неонового лазера падал на амплитудную пропускающую маску, содержащую суперпозиционную структуру. Оптическая система проецировала дифракционные картины с разных расстояний на камеру, что позволило получить распределение поля в трех измерениях, и, тем самым экспериментально получить суперпозиционные оптические решётки. В результате работы было получено хорошее согласие между расчётом и экспериментом, что говорит о применимости расчётной модели.

Формируемые оптические решетки могут найти применение в оптических манипуляциях, связанных с биомедицинскими приложениями.

### Литература

1. S. Feng, M. Wang, J. Wu, *Opt. Lett.*, 41(14), 3157–3160 (2016).
2. W. Sun, M. Shatalov, J. Deng, X. Hu, J. Yang, A. Lunev, Y. Bilenko, M. Shur, R. Gaska, *Appl. Phys. Lett.*, 96(6), 061102 (2010).
3. L. Stuerzebecher, T. Harzendorf, U. Vogler, U.D. Zeitner, R. Voelkel, *Opt. Express.*, 18(19), 19485–19494 (2010).
4. D.A. Ikonnikov, S.A. Myslivets, M.N. Volochaev, V.G. Arkhipkin, A.M. Vyunishev, *Sci. Rep.*, 10(1), 20315 (2020).
5. A.A. Novikov, A.S. Chirkin, *J. Exp. Theor. Phys.*, 106, 415–425 (2008).

## ИК ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК СЕЛЕНИДА СЕРЕБРА

В. Н. Дерепко, О. В. Овчинников, М. С. Смирнов, С. В. Асланов

*Воронежский государственный университет  
Россия, г. Воронеж, [derepko@phys.vsu.ru](mailto:derepko@phys.vsu.ru)*

В последние годы большой интерес вызывают полупроводниковые коллоидные квантовые точки (КТ), область светочувствительности и фотолюминесценции которых располагается в ближней ИК области спектра. Особое внимание уделяется селениду серебра благодаря узкой запрещённой зоне массивного кристалла  $E_g = 0,15$  эВ при комнатной температуре.

В работе представлены закономерности люминесценции гидрофильных КТ  $Ag_2Se$ , синтезированных в рамках методики водного синтеза с использованием в качестве пассиватора 2-меркапропропионовой кислоты (2МРА) (рис. 1)

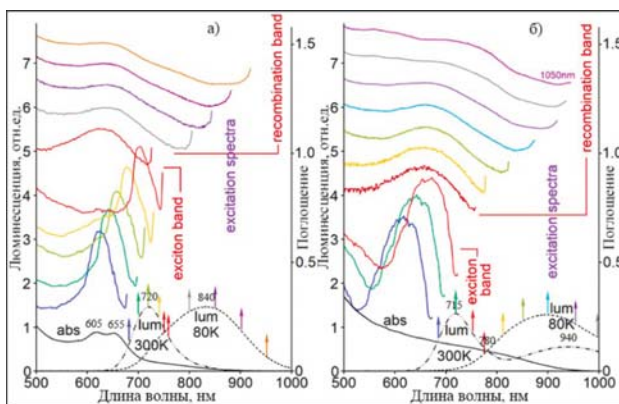


Рис. Спектры поглощения, люминесценции и её возбуждения  
КТ  $Ag_2Se/2MPA$  №1 – а,  $Ag_2Se/2MPA$  №2 – б

Обнаружено, что как увеличение концентрации прекурсора селена, так и понижение температуры образца до 80 К сопровождается разгоранием люминесценции в длинноволновой области (840–890 нм) и одновременно значительным тушением в коротковолновой полосе (715–720 нм). Анализ стока сдвига позволил предположить, что коротковолновый пик люминесценции возникает в результате излучательной аннигиляции экситона, а длинноволновый – рекомбинации на локализованных состояниях.

*Работа выполнена при поддержке грантом РФФ № 22-12-00232.*

## ВЫРАЩИВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО КРИСТАЛЛА Nd:MgMoO<sub>4</sub>

Я. С. Диденко<sup>1,2</sup>, К. А. Субботин<sup>1,2</sup>, А. И. Титов<sup>1,2</sup>, Д. А. Лис<sup>1</sup>,  
С. К. Павлов<sup>1,2</sup>, П. А. Волков<sup>3</sup>, М. П. Зыкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Россия, г. Москва,  
[ia.didenko@yandex.ru](mailto:ia.didenko@yandex.ru)*

<sup>2</sup>*Российский химико-технологический университет  
им. Д. И. Менделеева, Россия, г. Москва*

<sup>3</sup>*Институт химических реактивов и особо чистых химических веществ,  
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
Россия, г. Москва*

Методом Чохральского была выращена серия из десяти образцов перспективного лазерного кристалла Nd<sup>3+</sup>:MgMoO<sub>4</sub> в Pt/Rh тигле на воздухе. Исходные шихты для выращивания были приготовлены из MgO и MoO<sub>3</sub> квалификации чистоты не хуже 4N с добавлением 1 ат.% Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и проходили различные виды специальной обработки.

При выращивании кристаллов изученной серии в расплаве наблюдались включения побочных фаз, которые, по данным рентгено-фазового анализа (РФА), можно идентифицировать как MgO или неизвестную пока фазу молибдата магния с молярным соотношением MgO:MoO<sub>3</sub>, превышающим 1:1.

Измеренное фактическое содержание Nd в выращенных образцах варьировалось от 0,0027 до 0,0045 вес. %, а коэффициент распределения Nd в кристалле MgMoO<sub>4</sub>, соответственно, от 0,0034 до 0,006 в зависимости от вида специальной обработки, влияющей на рост и свойства кристаллов.

По результатам РФА были рассчитаны параметры элементарной ячейки кристаллов, а методом масс-спектрометрии с индукционно-связанной плазмы выявлены фактические составы кристаллов. Это позволило примерно установить область гомогенности MgMoO<sub>4</sub> и точку конгруэнтно плавящегося состава соединения, которое смещено в область избытка MoO<sub>3</sub> относительно точки стехиометрии.

Измерены спектры оптического поглощения и поляризованной фотолюминесценции (на переходах <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> и <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>). Рассчитаны величины сечений поглощения Nd<sup>3+</sup> в данной матрице. Спектральные полосы оказались неоднородно уширены. Измерена кинетика затухания люминесценции в районе 1,06 мкм: она оказалась моноэкспоненциальной для всех кристаллов. При этом интенсивности люминесценции и времена жизни заметно варьировались от образца к образцу в зависимости от вида обработки шихты.

## ОПТИЧЕСКИ-АКТИВНЫЕ ЦЕНТРЫ ТУЛИЯ В КРИСТАЛЛЕ ИТТРИЕВОГО СКАНДАТА

Е. А. Добрецова, О. К. Алимов, В. С. Цветков, С. Я. Русанов,  
В. В. Воронов, В. Б. Цветков

*Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН  
Россия, г. Москва, [elenadobretsova89@gmail.com](mailto:elenadobretsova89@gmail.com)*

Кристаллические волокна  $\text{YScO}_3$ , легированные ионом  $\text{Tm}^{3+}$ , выращены методом минипьедестала с лазерным нагревом.

Методом нестационарной лазерной спектроскопии получены время-разрешённые спектры люминесценции иона тулия (переход  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ ) при температурах 77 и 300 К. В качестве источника возбуждения ионов  $\text{Tm}^{3+}$  (переход  ${}^3H_6 \rightarrow {}^3H_5$ ) использовалось излучение параметрического лазера Solar 604.

Анализ спектров люминесценции и кинетики затухания люминесценции ионов  $\text{Tm}^{3+}$  в кристаллическом волокне  $\text{YScO}_3$  показал, что в данной матрице формируются три типа оптических центров. Два из которых, короткоживущие, с временами жизни  $\tau_{1(300\text{ К})} = 3,3$  мс и  $\tau_{1(77\text{ К})} = 3,7$  мс, и  $\tau_{2(300\text{ К})} = 3,87$  мс и  $\tau_{2(77\text{ К})} = 4,3$  мс. Обнаруженные центры были отнесены к низкосимметричным оптическим центрам с локальной симметрией  $C_2$ . Наблюдаемая разница во временах жизни ионов тулия в данной матрице обусловлена локальным замещением позиций ионов иттрия и скандия ионами тулия с близкими ионными радиусами. Третий долгоживущий оптический центр тулия с временами жизни  $\tau_{3(300\text{ К})} = 17$  мс и  $\tau_{3(77\text{ К})} = 19$  мс можно отнести к оптическому центру с более высокой симметрией локального окружения  $C_{3i}$ . Основанием приписать обнаруженный оптический центр к точечной группе симметрии  $C_{3i}$  обусловлено большим временем жизни метастабильного уровня  ${}^3F_4$ .

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-22-00968).*

## ШТАРКОВСКАЯ СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОННЫХ УРОВНЕЙ ИОНА НЕОДИМА В ИТТРИЕВОМ СКАНДАТЕ

Е. А. Добрецова, О. К. Алимов, В. С. Цветков, С. Я. Русанов,  
В. В. Воронов, В. Б. Цветков

*Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН,  
Россия, г. Москва, [elenadobretsova89@gmail.com](mailto:elenadobretsova89@gmail.com)*

Кристаллические волокна  $\text{YScO}_3$ , легированные ионом  $\text{Nd}^{3+}$ , выращены методом минипьедестала с лазерным нагревом.

Методами селективной лазерной спектроскопии получены спектры возбуждения (переходы  ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4F_{5/2} + {}^2H_{9/2}$ ) и люминесценции (переходы  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}, {}^4I_{11/2}$ ) ионов неодима. Выявлено два основных оптически-активных центра неодима и построена диаграмма Штарковских компонент уровней  ${}^4I_{9/2}$ ,  ${}^4I_{11/2}$  и  ${}^4F_{3/2}$  в кристалле  $\text{Nd}^{3+}:\text{YScO}$  (рис.). По оси ординат отложены энергии Штарковских компонент уровней  ${}^4I_{9/2}$ ,  ${}^4I_{11/2}$  и  ${}^4F_{3/2}$  для двух основных оптических центров ионов неодима с локальной группой симметрии  $C_2$ . Сделано предположение, что первый центр сформировался в результате локального замещения катиона  $\text{Y}^{3+}$  ионом  $\text{Nd}^{3+}$  в  $\text{YScO}_3$ , а второй центр обусловлен локальным замещением катиона  $\text{Sc}^{3+}$ .

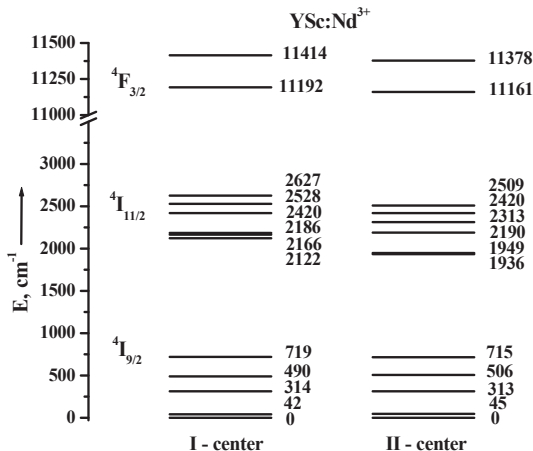


Рис. Диаграмма штарковских компонент уровней  ${}^4I_{9/2}$ ,  ${}^4I_{11/2}$  и  ${}^4F_{3/2}$  двух типов оптических центров ионов  $\text{Nd}^{3+}$  в  $\text{YScO}_3$ .

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-22-00968).*

## ОПТИЧЕСКИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ДАУН-КОНВЕРСИОННЫХ МИКРОЧАСТИЦ $\text{Nd}^{3+}$ , $\text{Yb}^{3+}:\text{LiYF}_4$

А. К. Докудовская, М. С. Пудовкин, Е. И. Олейникова,  
С. Л. Кораблева, О. А. Морозов

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики,  
Россия, г. Казань, [fyz0561999@gmail.com](mailto:fyz0561999@gmail.com)

Перспективными люминофорами для создания температурных сенсоров считаются кристаллические частицы, активированные ионной парой  $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ . Целью данной работы было исследование влияния условий возбуждения на температурную зависимость спектрально-кинетических характеристик люминофоров  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}:\text{LiYF}_4$ .

Возбуждение системы осуществлялось при  $\lambda_{\text{ex}} = 520$  и  $355$  нм в диапазоне температур  $80\text{--}320$  К. Исследовался параметр LIR (отношения интегральных интенсивностей полос люминесценции)  $\text{Nd}^{3+}$  ( ${}^4\text{F}_{3/2}$ ) к  $\text{Yb}^{3+}$  ( ${}^2\text{F}_{5/2}$ ). При  $\lambda_{\text{ex}} = 520$  нм ( ${}^4\text{I}_{9/2}\text{--}{}^2\text{K}_{13/2}/{}^2\text{G}_{9/2}$  полоса поглощения  $\text{Nd}^{3+}$ ) заселение уровня  ${}^4\text{F}_{3/2}$  ( $\text{Nd}^{3+}$ ) происходит за счет излучательных и безызлучательных процессов с верхних уровней (рис. 1). Однако при  $\lambda_{\text{ex}} = 355$  нм ( ${}^4\text{I}_{9/2}\text{--}{}^4\text{D}_{5/2}$  полоса поглощения  $\text{Nd}^{3+}$ ) заселение уровня  ${}^4\text{F}_{3/2}$  ( $\text{Nd}^{3+}$ ) происходит за счет еще одного дополнительного процесса кросс-релаксации. Таким образом, за счет исследования параметра LIR мы хотели оценить вклад процесса кросс-релаксации на температурную чувствительность.

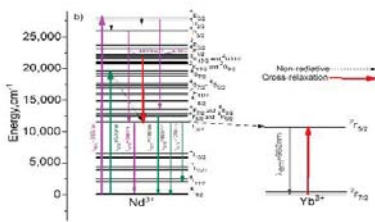


Рис. 1. Схематическая диаграмма энергетических уровней

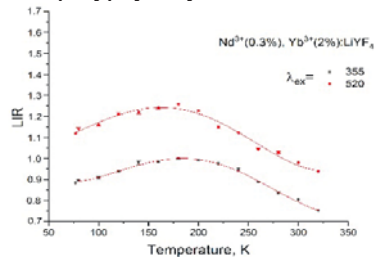


Рис. 2. Функции LIR при различных длинах волн возбуждения  $\lambda_{\text{ex}} = 520$  нм и  $\lambda_{\text{ex}} = 355$  нм  $\text{Nd}^{3+}$

Форма функции LIR (рис. 2) слабо зависит от  $\lambda_{\text{ex}}$ , следовательно, процесс кросс-релаксации незначительно влияет на температурную чувствительность. Время нарастания люминесценции  $\text{Nd}^{3+}$  ( ${}^4\text{F}_{3/2}\text{--}{}^4\text{I}_{9/2}$ ) слабо зависит от температуры, что дополнительно свидетельствует о малом влиянии процесса кросс-релаксации на температурную чувствительность. Максимальные значения абсолютной ( $S_a$ ) и относительной ( $S_r$ ) температурной чувствительности достигается для  $\text{Nd}^{3+}$  (0,3 %),  $\text{Yb}^{3+}$  (1,0 %): $\text{LiYF}_4$  ( $S_a = 0,007 \text{ K}^{-1}$  при  $320 \text{ K}$ ) и для  $\text{Nd}^{3+}$  (0,3 %),  $\text{Yb}^{3+}$  (5,0 %): $\text{LiYF}_4$  ( $S_r = 1,03 \text{ \%}\cdot\text{K}^{-1}$  при  $260 \text{ K}$ ) соответственно.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-00129.

## ФОРМИРОВАНИЕ И СПЕКТР ОДНОЦИКЛОВОЙ СВЕТОВОЙ ПУЛИ СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

А. Е. Дормидонов<sup>1</sup>, Е. Д. Залозная<sup>1,2</sup>, В. О. Компанец<sup>3</sup>, В. А. Симонова<sup>1</sup>,  
С. В. Чекалин<sup>3</sup>, В. П. Кандидов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики  
им. Н. Л. Духова, Россия, г. Москва, [AEDormidonov@vniia.ru](mailto:AEDormidonov@vniia.ru)*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Россия, г. Москва*

<sup>3</sup>*Институт спектроскопии РАН, Россия, г. Троицк*

Представлены результаты всестороннего исследования феномена световых пульс, формирующихся при филаментации в условиях аномальной дисперсии групповой скорости фемтосекундного лазерного излучения среднего инфракрасного диапазона в твердотельных диэлектриках [1; 2]. Рассмотрена зависимость пороговой мощности образования световых пульс от соотношения дифракционной и дисперсионной длин импульса. Предложен метод определения размеров экстремально сжатого и сильно искаженного волнового пакета, основанный на анализе пространственно-временного распределения напряженности электрического поля. Оценки радиуса световой пули, полученные этим методом, составляют 1–3 несущих длины волны, длительность близка к периоду оптических осцилляций. Впервые исследовано «дыхание» световой пули, вызванное сдвигом несущей волны относительно огибающей импульса, а также индуцируемая ими периодическая модификация диэлектриков. Установлено, что ширина и положение антистоксова крыла спектра световой пули зависят от длины волны импульса и ширины запрещенной зоны диэлектрика, а положение его коротковолновой отсечки определяется порядком многофотонности. Получено дисперсионное уравнение для длины волны спектрального максимума антистоксова крыла, обобщающее все известные экспериментальные результаты. На основе анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований сформулированы основные закономерности формирования и динамики экстремально сжатых волновых пакетов при филаментации в условиях аномальной дисперсии групповой скорости.

### Литература

1. Y. Silberberg, *Opt. Lett.*, 15(22), 1282–1284 (1990).
2. E.O. Smetanina, V.O. Kompanets, A.E. Dormidonov, S.V. Chekalin, V.P. Kandidov, *Laser Phys. Lett.*, 10(10), 105401 (2013).

## АНИЗОТРОПИЯ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ

В. П. Дресвянский, Е. Ф. Мартынович

*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН,  
Россия, г. Иркутск, [ibchief@ilph.irk.ru](mailto:ibchief@ilph.irk.ru)*

В докладе будут представлены результаты комплексного исследования процессов генерации люминесцирующих дефектов в широкозонных кристаллических средах, с преимущественно экситонным механизмом дефектообразования, при их облучении фемтосекундным лазерным излучением ближнего ИК диапазона, энергия квантов которого примерно в десять раз меньше энергии межзонных переходов. В экспериментах был реализован режим взаимодействия света с образцом, соответствующий условиям низкоапертурной внешней фокусировки, при котором интенсивность уже достаточна для эффективного нелинейного поглощения света и возбуждения электронной подсистемы вещества, а энергия импульсов недостаточна для лазерного пробоя или иного разрушения образца. В данных условиях облучения самофокусировка и филаментация светового излучения играют доминирующую роль в процессах лазерно-индуцированного дефектообразования [1].

Для экспериментального изучения процессов лазерного дефектообразования в кристаллической среде применялась совокупность методик лазерной люминесцентной спектроскопии [2]. В частности, для визуализации продольного и поперечного пространственных распределений концентраций люминесцирующих дефектов в местах прохождения филаментов, индуцируемых лазерным излучением, использовался метод люминесцентной томографии и люминесцентного Z-сканирования [3].

Установлено, что азимутальные зависимости эффективности межзонной нелинейной фотоионизации и эффективности самофокусировки находятся в противофазе. Эти два процесса, нелинейная фотоионизация и самофокусировка, управляются двумя разными тензорами: тензором эффективной массы и тензором нелинейной восприимчивости третьего порядка, соответственно. Проведенные экспериментальные и теоретические исследования и математическое моделирование показали, что азимутальная анизотропия взаимодействия интенсивного лазерного излучения с кристаллическими средами кубической сингонии сказывается на эффективности образования практически всех типов простых и агрегатных электронных центров окраски через два механизма. Во-первых, через управление величиной эффективной нелинейной восприимчивости третьего порядка, определяемой компонентами ее тензора, и контролирующей самофокусировку и величину ее критической интенсивности, и, во-вторых, через управление эффективной массой действующих носителей,



участвующих в процессах внелинейной межзонной фотоионизации и образовании анионных экситонов, распадающихся затем на френкелевские пары, которые в ходе последующих процессов миграции, перезарядки и агрегации формируют стабильные люминесцирующие квантовые системы. В результате совместного действия этих двух факторов в схеме с нормальным падением лазерного луча на плоскость грани куба эффективность дефектообразования является периодической функцией азимутального угла, определяющего ориентацию электрического вектора  $E$  по отношению к направлению ребра куба с периодом  $\pi/2$  и имеет максимумы при углах, равных  $n\pi/4$ , где  $n = 1, 3, 5 \dots$  [3].

На основе полученных данных теоретических и экспериментальных исследований, на примере кристаллов фторида лития, была сформирована физическая модель процессов лазерно-индуцированного дефектообразования в диэлектрических кристаллах, включающая самофокусировку и филаментацию возбуждающего оптического излучения, нелинейную ионизацию вещества с генерацией электронно-дырочных пар и экситонов, распад экситонов на первичные френкелевские дефекты, их перезарядку, миграцию, агрегацию и нуклеацию, с учетом азимутальной анизотропии взаимодействия интенсивного лазерного излучения с кубическими кристаллами и локального нагрева материала в областях прохождения световых филаментов.

*Работа выполнена в рамках плана фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 года (№ проекта 0243-2021-0004).*

### Литература

1. Martynovich E.F., Dresvyanskiy V.P., Kuznetsov A.V., Kuzakov A.S., Popov A.A., Alekseev S.V., Losev V.F., Ratakhin A.N., Bagayev S.N., *Laser Phys.*, 24(7), (2014).
2. Martynovich E.F., Chernova E.O., Dresvyanskiy V.P., Bugrov A.E., Kostryukov P.V., Konyashchenko A.V., *Opt. Laser Technol.*, 131, (2020).
3. Martynovich E.F., Dresvyanskiy V.P., Rakevich A.L., Lazareva N.L., Arsentieva M.A., Tyutrin A.A., Bukhtsoozh O., Enkhbat S., Kostryukov P.V., Perminov B.E., Konyashchenko A.V., *Appl. Phys. Lett.*, 114(12), (2019).

## ПЕРЕСТРОЙКА БЛИЖАЙШЕГО ОКРУЖЕНИЯ ОКОЛО НЕУСТОЙЧИВЫХ ПРИМЕСНЫХ ИОНОВ

А. В. Егранов

*Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН  
Россия, г. Иркутск, [alegra@igc.irk.ru](mailto:alegra@igc.irk.ru)*

В предыдущих работах [1; 2] нами была рассмотрена неустойчивость некоторых двухвалентных редкоземельных ионов (La, Ce, Gd, Tb, Lu и Y), для которых основное  $d^1$  состояние локализовано в зоне проводимости в щелочноземельных фторидах. Было показано, что такая неустойчивость вследствие эффекта Яна-Теллера приводит к образованию около двухвалентного редкоземельного иона анионной вакансии, которая понижает основное состояние этого иона и делает его устойчивым в решетке щелочноземельных фторидов. При этом при локализации основного  $d^1$  состояния в зоне проводимости эффект Яна-Теллера приводит к значительно более сильным искажениям решетки, чем обычно наблюдается при локализации вырожденных  $d$  состояний в запрещенной зоне.

В настоящей работе исследования по неустойчивости некоторых примесных ионов в кристаллах типа флюорита расширены за счет ионов переходных металлов. Обнаружено, что спектр ЭПР фотохромных РС центров в кристаллах типа флюорита похож на ЭПР спектр радиационных примесных центров в кристаллах  $\text{CaF}_2$  и  $\text{SrF}_2$ , активированных примесью хрома, хотя в последнем случае сигнал ЭПР на порядок выше. Однако спектры поглощения и температурные зависимости образования и разрушения обоих центров сильно различаются. Можно полагать, что для обоих центров одинаково основное состояние и сильно различаются возбужденные состояния. В кристаллах  $\text{BaF}_2$ , активированных редкоземельными ионами (La, Ce, Gd, Tb, Lu и Y) фотохромные центры не образуются или в лучшем случае образуются с трудом. Однако в кристаллах  $\text{BaF}_2\text{-Cr}$ , радиационно наведенные примесные центры образуются, хотя и с меньшей эффективностью, чем в кристаллах  $\text{CaF}_2$  и  $\text{SrF}_2$ . Для этих центров наблюдается ЭПР спектр отличный от спектров в кристаллах  $\text{CaF}_2$  и  $\text{SrF}_2$ , прежде всего более низкой симметрией и анизотропным  $g$ - фактором.

В работе на основании данных ЭПР, оптических и температурных измерений обсуждаются модели радиационно наведенных примесных центров в кристаллах, активированных некоторыми редкоземельными ионами, а также ионами хрома.

### Литература

1. A.V. Egranov, T.Yu. Sizova, R.Yu. Shendrik, N.A. Smirnova, *J. Phys. Chem. Solids*, 90, 7–15 (2016).
2. A.V. Egranov, T.Yu. Sizova, *J. Phys. Chem. Solids*, 74(3), 530–534 (2013).

## МЕЖЗОННАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ В АЛМАЗЕ ЧЕРЕЗ ЛОКАЛЬНЫЕ ЦЕНТРЫ

А. С. Емельянова<sup>1</sup>, В. П. Миронов<sup>1</sup>, Д. С. Глазунов<sup>1</sup>, С. А. Шабалин<sup>2</sup>,  
Е. В. Бубыр<sup>2</sup>, Л. В. Казаков<sup>2</sup>, Е. Ф. Мартынович<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН,  
Россия, г. Иркутск, [nastasia705@mail.ru](mailto:nastasia705@mail.ru)*

<sup>2</sup>*АО «Инновационный центр «Буревестник», Россия, г. Санкт-Петербург,*

В некоторых алмазах при возбуждении рентгеновским излучением А-полоса рентгенолюминесценции отсутствует, а в спектре люминесценции присутствуют интенсивные полосы N3 центров, их кинетика затухания содержит только кратковременный компонент, соответствующий N3 центрам. Такая люминесценция обнаружена также при возбуждении в области фундаментального поглощения. Полученный результат является особенностью этих алмазов. О возбуждении рентгеновском излучением только N3 центров в литературных источниках не сообщалось.

Напомним, что А-полоса люминесценции начинает возбуждаться энергиями квантов свыше 5,15 эВ, т.е., при появлении электронов проводимости и дырок валентной зоны за счет ионизации атомов углеродного остова кристалла [1]. При характерных концентрациях А-дефектов  $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$  в спектрах люминесценции некоторых образцов наблюдается А-полоса свечения, искаженная поглощением N3-центров. В данном случае люминесценция А-полосы является следствием электронно-дырочной рекомбинации через А-дефекты, а процесс возбуждения N3 полосы реализуется по реабсорбционному механизму путем поглощения части излучения А-полосы [2].

В спектрах алмазов с низким содержанием А-дефектов, но существенным ( $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) содержанием N3 центров процессы электронно-дырочной рекомбинации через А-дефекты второстепенны, доминирует процесс прямой передачи энергии электронов проводимости к возбужденным состояниям N3-центра. В этом случае N3-центр является центром электронно-дырочной рекомбинации.

Процесс захвата дырки примесным центром, с последующей рекомбинацией электрона на образовавшемся ионизованном примесном центре с его возбуждением и высвечиванием, известен, например, в щелочно-галоидных кристаллах. В [3] высказывалось мнение, что в алмазе такой электронно-дырочный механизм блокирован или он маловероятен. В данном случае блокирующим (конкурирующим) процессом является процесс рекомбинации через А-дефекты. При отсутствии А-дефектов и конкурирующих процессов с их участием, процесс электронно-дырочной рекомбинации реализуется непосредственно через N3 дефекты.

*Работа поддержана научным проектом 0243-2021-0004 в рамках плана фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 г.*

### Литература

1. Е.Ф. Мартынович, В.П. Миронов, *Изв. вузов. Физика*, 52(12-3), 202–210 (2009).
2. V.P. Mironov, A.S. Emelyanova, S.A. Shabalin, E.V. Bubyrg, L.V. Kazakov, E.F. Martynovich, *AIP Conf. Proc.*, 2392, 020010 (2021).
3. А.С. Емельянова, *Вопросы естествознания*, 2(6), 31–34 (2015).

## ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ОПТО-АКУСТИЧЕСКОГО ГАЗОВОГО СЕНСОРА С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ПОИСКОМ ЭКСТРЕМУМА

Е. Ю. Ерушин<sup>1,2,3</sup>, А. Е. Беднякова<sup>1</sup>, И. Б. Мирошниченко<sup>2,3</sup>,  
Н. Ю. Костюкова<sup>1,2,3</sup>, А. А. Бойко<sup>1,2</sup>, А. А. Редюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,  
Россия, г. Новосибирск, [render2012@yandex.ru](mailto:render2012@yandex.ru)

<sup>2</sup>Институт лазерной физики СО РАН, Россия, г. Новосибирск

<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет, Россия, г. Новосибирск

В современном мире оптические газовые датчики широко используются в различных областях. Среди различных типов газовых сенсоров опто-акустический сенсор заслуживает особого внимания благодаря своей высокой чувствительности и селективности. Для непрерывного мониторинга концентрации определенного газа особенно существенным недостатком опто-акустического сенсора является дрейф резонансной частоты газовой ячейки [1], так как отстройка от нее снижает чувствительность системы и занижает показания концентрации газа.

Для решения обозначенной проблемы и повышения долговременной стабильности опто-акустического газового сенсора нами предложено решение на основе алгоритма управления поиском экстремума. Алгоритм позволяет автоматически подстраивать частоту модуляции лазера для компенсации изменения резонансной частоты газовой ячейки, что делает измерение концентрации газа более точным. Результаты экспериментальных исследований показывают, что алгоритм может эффективно поддерживать стабильность сигнала с опто-акустического датчика в течение длительных периодов времени в условиях быстро изменяющейся температуры, что делает его пригодным для различных применений, включая мониторинг окружающей среды, разведку нефти и управление промышленными процессами.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 17-72-30006.*

### Литература

1. S. Palzer, *Sensors*, 20, 2745 (2020).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОГА ЛУЧЕВОЙ СТОЙКОСТИ НОВОГО КРИСТАЛЛА $\text{Ba}_2\text{Ga}_8\text{GeS}_{16}$

Е. Ю. Ерушин<sup>1,2,3</sup>, Н. Ю. Костюкова<sup>1,2,3</sup>, А. А. Бойко<sup>1,2</sup>, Е. В. Баранова<sup>3</sup>,  
Д. М. Вербоватый<sup>2</sup>, Д. В. Бадиков<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,  
Россия, г. Новосибирск, [render2012@yandex.ru](mailto:render2012@yandex.ru)

<sup>2</sup>Институт лазерной физики СО РАН, Россия, г. Новосибирск

<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет, Россия, г. Новосибирск

<sup>4</sup>Кубанский государственный университет, Россия, г. Краснодар

В качестве альтернативы кристаллам  $\text{ZnGeP}_2$  (ZGP),  $\text{AgGaS}_2$  (AGS) и  $\text{AgGaSe}_2$  (AGSe) в последнее десятилетие в Лаборатории новейших технологий Кубанского государственного университета была отработана технология синтеза и выращивания бариевых халькогенидов. Кристаллы бариевых халькогенидов являются перспективными кристаллами для параметрического преобразования частоты, так как обладают рядом полезных характеристик, а именно: выделяются высокой лучевой стойкостью и широким диапазоном прозрачности. Новый бариевый кристалла  $\text{Ba}_2\text{Ga}_8\text{GeS}_{16}$  (B2GGS) прозрачен по уровню 0 до 12 мкм и имеет эффективную нелинейность сравнимую с кристаллами AGS (~ 13 пм/В) [1]. Исследование лучевой стойкости имеет большое значение при оценки потенциала этих материалов для практического применения

В данной работе исследовалась лучевая стойкость нового кристалла  $\text{Ba}_2\text{Ga}_8\text{GeS}_{16}$  к излучению с длиной волны 1053 нм при частоте следования импульсов 0,1 и 1 кГц методом R-on-1. В результате порог лучевой стойкости на частоте повторения импульсов 1 кГц с вероятностью 0 % составил 7,1 Дж/см<sup>2</sup>. Такая высокая лучевая стойкость и относительно высокая нелинейность делает данный материал привлекательным для создания высокоэнергетических параметрических преобразователей частоты.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках реализации программы развития НГТУ, научный проект № С23-22.*

### Литература

1. V.V. Badikov, D.V. Badikov, G.S. Shevyrdyaeva, K. Kato, N. Umemura, K. Miyata, V.L. Panyutin, V. Petrov, *J. Alloys Compd.*, 907, 164378 (2022).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛУЧЕВОЙ СТОЙКОСТИ СЕРОСОДЕРЖАЩИХ КРИСТАЛЛОВ БАРИЕВЫХ ХАЛЬКОГЕНИДОВ

Е. Ю. Ерушин<sup>1,2,3</sup>, Н. Ю. Костюкова<sup>1,2,3</sup>, А. А. Бойко<sup>1,2</sup>,  
Е. В. Баранова<sup>3</sup>, Д. М. Вербоватый<sup>2</sup>, Д. В. Бадиков<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,  
Россия, г. Новосибирск, [render2012@yandex.ru](mailto:render2012@yandex.ru)

<sup>2</sup>Институт лазерной физики СО РАН, Россия, г. Новосибирск

<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет, Россия, г. Новосибирск

<sup>4</sup>Кубанский государственный университет, Россия, г. Краснодар

Серосодержащие кристаллы бариевых халькогенидов являются многообещающими кандидатами для создания параметрических преобразователей частоты с высокой энергией в импульсе из-за их высокого порога лучевой стойкости к излучению накачки. Порог лазерного разрушения кристаллов является важнейшим параметром при проектировании лазерных систем, определяющим их работоспособность и надежность [1]. В данной работе мы исследовали оптический порог пробоя двух перспективных серосодержащих кристаллов бариевых халькогенидов,  $\text{BaGa}_4\text{S}_7$  (BGS) и  $\text{BaGa}_2\text{GeS}_6$  (BGGs). Для эксперимента была выбрана методика Ron-1. Длина волны лазера составляла 1053 нм, длительность импульса  $\sim 5$  нс. Кроме того, мы исследовали влияние частоты повторения импульсов на оптический порог пробоя этих кристаллов при 0,1 и 1,0 кГц. Дополнительно была проанализирована морфология образовавшегося повреждения с помощью сканирующей электронной микроскопии. Экспериментальные результаты показали, что кристаллы BGS и BGGs демонстрируют высокие значения оптического пробоя при обеих частотах следования импульсов. В частности, порог пробоя кристаллов BGS и BGGs на частоте следования импульсов 1,0 кГц составил 6,5 Дж/см<sup>2</sup> и 6,6 Дж/см<sup>2</sup>, соответственно. Полученные результаты подтверждают перспективность применения указанных кристаллов для генерации излучения с высокой энергией в импульсе в среднем ИК-диапазоне.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Госзадания FSUS-2020-0036.*

### Литература

1. N.Y. Kostyukova, A.A. Boyko, E.Y. Erushin, A.I. Kostyukov, V.V. Badikov, D.V. Badikov, D.B. Kolker, *J. Opt. Soc. Am. B*, 36(8), 2260–2265 (2019).

## ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ КАУСТИК ГАУССОВЫХ ПУЧКОВ В РЕЗОНАТОРЕ ЩЕЛЕВОГО СО<sub>2</sub>-ЛАЗЕРА

М. А. Жилин<sup>1,2</sup>, А. И. Карапузиков<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>ООО «Специальные технологии», Россия, г. Новосибирск, [mikhail.zhilin.1999@mail.ru](mailto:mikhail.zhilin.1999@mail.ru)

<sup>2</sup>Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,  
Россия, г. Новосибирск

<sup>3</sup>Институт лазерной физики СО РАН, Россия, г. Новосибирск

Волноводные СО<sub>2</sub>-лазеры с высокочастотным (ВЧ) возбуждением широко применяются в технологии, приборостроении и медицине. В качестве активной среды, как правило, используется смесь газов СО<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He и Xe при общем давлении от нескольких десятков до сотен торр. Важную роль в лазерах такого типа играет эффективное использование активной среды.

В данной работе разработана модель каустик в оптическом резонаторе щелевой конфигурации на основе ABCD матриц в приближении гауссовых пучков. В этом приближении пучок в каждой точке пространства описывается двумя параметрами: радиусом пятна и радиусом кривизны волнового фронта. Для удобства используется так называемый комплексный параметр пучка

Среда щелевого лазера, вдоль которой распространяется излучение, представлялась дискретным набором ABCD матриц, учитывающих коэффициент преломления и радиусы кривизны поверхностей. Модель даёт возможность учитывать изменение коэффициента преломления в плазме вдоль всей длины резонатора.

После получения пространственных конфигураций гауссового пучка внутри резонатора, был проведен эксперимент в стендовом варианте, моделирующий обход пучка в резонаторе в прямом и обратном направлении, который подтвердил корректность модели в условиях лаборатории.

Были также получены каустики пучка для щелевого СО<sub>2</sub> лазера с резонатором телескопической конфигурации, с последующей разработкой и изготовлением профилированных электродов под структуру резонатора.

По полученной модели был разработан одномодовый СО<sub>2</sub> лазер, излучающий на длине волны 9,5 мкм с высокими удельными энергетическими характеристиками (мощность 55 Вт, КПД 14 %), что важно для многих приложений.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ Yb:YSAG КЕРАМИКИ

В. Ю. Жмыхов<sup>1</sup>, Д. А. Гурьев<sup>1</sup>, Е. А. Добрецова<sup>1</sup>, В. С. Цветков<sup>1</sup>,  
С. В. Кузнецов<sup>1</sup>, М. С. Никова<sup>2</sup>, И. С. Чикулина<sup>2</sup>, Д. С. Вакалов<sup>2</sup>,  
В. А. Тарала<sup>2</sup>, В. Б. Цветков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Россия, г. Москва,  
[vadimzhmykhov56@gmail.com](mailto:vadimzhmykhov56@gmail.com)

<sup>2</sup>Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, г. Ставрополь

В данной работе мы представляем результаты исследования спектральных и генерационных характеристик лазера на Yb:YSAG ( $Y_{2,52}Yb_{0,25}Sc_{0,38}Al_{4,85}O_{12}$ ) керамике с концентрацией активатора 8,3(3) ат.%. Состав керамики был выбран из области существования однофазных твердых растворов на основе иттрий-скандий-алюминиевых гранатов, легированных иттербием [1]. Подробное описание процесса синтеза керамики и методики измерения спектрально-генерационных характеристик приведено в статье [2].

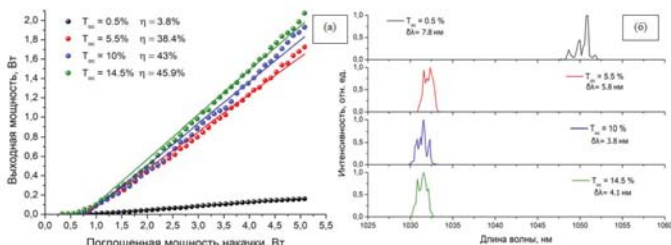


Рис. (а) Зависимости выходной мощности Yb:YSAG лазера с разными коэффициентами пропускания выходного зеркала; (б) спектры лазерного излучения, измеренные при поглощенной мощности накачки 3,6 Вт, для выходных зеркал с разными коэффициентами пропускания

Максимальная выходная мощность лазера в квази-непрерывном режиме генерации составила 2,1 Вт при поглощенной мощности накачки 5 Вт (рис., а). Максимальный дифференциальный КПД составил 45,9 % для зеркала с коэффициентом пропускания 14,5 %. В зависимости от коэффициента пропускания выходного зеркала происходит изменение длины волны генерации от 1052 нм ( $T = 0,5 \%$ ) до 1033 нм ( $T > 5,5 \%$ ) (рис., б).

*Работа поддержана Грантом Президента Российской Федерации, № МК-72.2022.1.2.*

### Литература

1. F.F. Malyavin, V.A. Tarala, S.V. Kuznetsov, A.A. Kravtsov, I.S. Chikulina, M.S. Shama, E.V. Medyanik, V.S. Ziryakov, E.A. Evtushenko, D.S. Vakalov, V.A. Lapin, D.S. Kuleshov, L.V. Tarala, L.M. Mitrofanenko, *Ceram. Int.*, 45(4), 4418–4423 (2019).
2. В.Ю. Жмыхов, Д.А. Гурьев, В.С. Цветков, Е.А. Добрецова, Ю.Н. Пырклов, С.В. Кузнецов, М.С. Никова, В.А. Тарала, Д.С. Вакалов, А.А. Кравцов, В.Б. Цветков, *Оптика и спектроскопия*, 131(5), 597–604 (2023).



## ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОДНОЦИКЛОВОЙ СВЕТОВОЙ ПУЛИ С ДИЭЛЕКТРИКОМ

Е. Д. Залозная<sup>1,2</sup>, А. Е. Дормидонов<sup>1</sup>, В. О. Компанец<sup>3</sup>,  
В. А. Симонова<sup>1</sup>, С. В. Чекалин<sup>3</sup>, В. П. Кандидов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики  
им. Н. Л. Духова, Россия, г. Москва, ed.zaloznaya@physics.msu.ru*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Россия, г. Москва*

<sup>3</sup>*Институт спектроскопии РАН, Россия, г. Москва, г. Троицк*

При филаментации фемтосекундного лазерного излучения в условиях аномальной дисперсии групповой скорости происходит формирование световой пули – волнового пакета экстремально сжатого и в пространстве, и во времени [1]. Представлены результаты численного и экспериментального исследования динамики высокоинтенсивных одноцикловых импульсов в щелочно-галогидном кристалле LiF. Численное моделирование выполнено в приближении однонаправленного распространения импульсного излучения. Уравнения рассматриваемой модели описывают дифракцию пучка, дисперсию импульса, изменения показателя преломления, связанные с керровской и плазменной нелинейностью, а также ослабление излучения при фотоионизации. Экспериментальные измерения проводились методом лазерной колорации, позволяющим работать в одноимпульсном режиме, что исключает ошибки, связанные с флуктуациями параметров излучения от импульса к импульсу [2]. Зарегистрирована периодическая модуляция плотности наведенных центров окраски, демонстрирующая периодическое «дыхание» импульса и вызванное им изменение эффективности взаимодействия со средой. Установлено определяющее влияние длины волны излучения на период наблюдаемых осцилляций и показано уменьшение амплитуды осцилляций при переходе от линейной к круговой поляризации излучения. Результаты исследования зависимости амплитуды осцилляций от длительности лазерного импульса позволили предложить способ определения длительности одноцикловых импульсов, свободный от сложной экспериментальной схемы и дальнейшей сложной математической обработки измерений.

### Литература

1. L. Bergé, S. Skupin, *Phys. Rev. Lett.*, 100, 113902 (2008).
2. С.В. Чекалин, В.О. Компанец, *Опт. и спектр.*, 127(7), 94–100 (2019).

## ОПТИЧЕСКОЕ СЧИТЫВАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ $MgB_4O_7:Dy,Na$

И. А. Захарчук<sup>1,2</sup>, Д. С. Дайбаге<sup>1,2</sup>, А. В. Осадченко<sup>1,2</sup>, А. С. Селюков<sup>1,2</sup>,  
С. А. Амброзевич<sup>1,2</sup>, М. И. Данилкин<sup>1,3</sup>, О. В. Ивкина<sup>4</sup>, И. В. Мосягина<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет  
им. Н. Э. Баумана, Россия, г. Москва

<sup>2</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН,  
Россия, г. Москва, [zakharchukia@yandex.ru](mailto:zakharchukia@yandex.ru)

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский  
университет), Россия, г. Долгопрудный

<sup>4</sup>АО «Специализированный научно-исследовательский институт  
приборостроения», Россия, г. Москва

При протонно-лучевой терапии опухолей для планирования облучения пациентов нужна простая и удобная метрология протонного пучка. Материал для изготовления запоминающих рентгеновских экранов стоит выбирать наиболее тканеэквивалентным, среди боратов за счет отсутствия иных недостатков таковым является  $MgB_4O_7:Dy,Na$  [1]. Удобно визуализировать распределение дозы и можно ли изготовить из такого материала экран со считыванием посредством оптической стимуляции?

В работе были использованы детекторы ТЛД-580н. Они облучались источником БИС-20 ( $^{90}Sr/^{90}Y$ ) дозой 0,66 Гр и освещались светодиодами разных длин волн с целью получения кривых термовысвечивания. Для исследования спектрального состава термически стимулированной люминесценции детекторы облучали импульсами электронного ускорителя «РАДАН-ЭКСПЕРТ». Оптически стимулированная люминесценция исследовалась на установке, в которой возбуждение происходило через монокроматор спектрофлуориметра Hitachi 650-60. Излучение записывалось спектрометром Ocean Optics Maya 2000 Pro.

Эффективное оптическое «стирание» кривой ТСЛ у детекторов ТЛД-580н не сопровождается их люминесценцией, оптическая стимуляция считывания для этого материала невозможна. Это связано с зарядовым состоянием диспрозия, который исходно стабилизирован в матрице в состоянии  $2+$ .

### Литература

1. А.С. Селюков, А.Э. Применко, Т.А. Гарденина, М.И. Данилкин, *Краткие сообщения по физике ФИАН*, 47(11), 37–45 (2020).

## ВЛИЯНИЕ ОБОЛОЧКИ $\text{SiO}_2$ НА НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК PbS В ПРИСУТСТВИИ НАНОСТЕРЖНЕЙ ЗОЛОТА

А. И. Звягин, Т. А. Чевычелова, О. В. Овчинников

*Воронежский государственный университет,  
Россия, г. Воронеж, [andzv92@yandex.ru](mailto:andzv92@yandex.ru)*

Присутствие наночастиц благородных металлов вблизи квантовых точек может существенно влиять на оптические свойства последних. В работе рассмотрены нелинейно-оптические свойства квантовых точек (КТ) PbS пассивированных тиогликолевой кислотой, средним размером 3,5 нм и этих же КТ покрытых монослоем  $\text{SiO}_2$  в присутствии наностержней золота (NRs) (4x25 нм) с пиком продольного плазмонного резонанса на длине волны 915 нм, приходящимся на особенность в поглощения КТ (913 нм), связанную с первым экситонным переходом в КТ. Таким образом достигалась настройка резонансов в поглощении КТ и экстинкции NRs. Золотые наностержни и КТ PbS получены методом гидрофильного коллоидного синтеза. Смеси КТ+NRs получали путем смешивания исходных растворов, соотношение КТ к NRs составляло порядка 1000:1.

Исследования проводились с использованием методики Z-сканирования. Исследуемые растворы зондировались лазерными импульсами длительностью 10 нс на длине волны 532 нм, энергия лазерных импульсов составляла 0,16 мДж.

Исходные КТ PbS демонстрировали нелинейную рефракцию (дефокусировку) и незначительное нелинейное поглощение. Покрытие КТ PbS монослоем диоксида кремния практически не повлияло на нелинейное поглощение и рефракцию в сравнении с исходными КТ. Наблюдалось увеличение интенсивности фотолюминесценции КТ PbS при покрытии их монослоем  $\text{SiO}_2$  в 4,5 раза, связанное с пассивацией поверхностных дефектов, которые могут являться каналами безызлучательной рекомбинации электронных возбуждений.

Внесение в раствор КТ PbS плазмонных наностержней золота изменяло нелинейно-оптический отклик КТ PbS, на фоне нелинейной рефракции наблюдалось возрастание нелинейного поглощения, причем в случае КТ PbS/ $\text{SiO}_2$  величина провала в Z-скане была в 1,3 раза меньше, чем в случае с не модифицированными КТ. Данный результат подтверждает возможность настройки нелинейно-оптических свойств гибридной наносистемы за счет управления переносом заряда. Что подтверждается тушением люминесценции КТ и ускорением кинетики люминесценции.

*Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-22-00842.*

## ПРОЯВЛЕНИЕ ПЛАЗМОН-ЭКСИТОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКОМ ОТКЛИКЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ В ПРИСУТСТВИИ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА

А. И. Звягин, Т. А. Чевычелова, О. В. Овчинников

*Воронежский государственный университет,  
Россия, г. Воронеж, [andzv92@yandex.ru](mailto:andzv92@yandex.ru)*

В работе исследовалось проявление эффектов плазмон-экситонного взаимодействия в структурах со значительной расстройкой оптических резонансов поглощения и люминесценции. Объектом исследования являлась наноструктура на основе квантовых точек (КТ)  $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$  средним размером 2,4 нм и наночастиц (НЧ) серебра сферической геометрии средним размером 10 нм. В спектре поглощения КТ  $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$  наблюдалась особенность в поглощении, связанная с наиболее вероятным переходом на длине волны 341 нм, спектр экстинкции Ag НЧ имел пик плазмонного резонанса с максимумом при 400 нм. Спектр люминесценции КТ  $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$  представлял собой широкую полосу, с максимумом при 480 нм. Исследования нелинейно-оптических свойств проводили с использованием стандартной методики Z-сканирования, с использованием импульсного 10 нс лазера с длиной волны зондирующего излучения 532 нм и энергией импульса 1,33 мДж.

Z-сканы полученных в геометрии с закрытой апертурой демонстрируют нелинейную рефракцию (дофокусировку) и отсутствие нелинейного поглощения в КТ  $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ . При добавлении в раствор КТ НЧ рефракционный отклик КТ модифицировался в абсорбционный  $\Delta T = 0,21$ . Стоит отметить, что чистые НЧ демонстрировали незначительный нелинейно-оптический отклик (снижение пропускания образца за счет динамического рассеяния)  $\Delta T = 0,05$ . Таким образом, можно судить об изменении нелинейно-оптических свойств именно КТ  $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$  в присутствии НЧ Ag.

При сопряжении данных наноструктур наблюдалось увеличение экстинкции смеси в диапазоне длин волн 380–600 нм, а также тушение люминесценции в 2 раза и ускорение кинетики люминесценции с 446 нс до 348 нс. Тушение люминесценции, ускорение кинетики и изменение экстинкции полученной наноструктуры свидетельствует о резонансном безызлучательном переносе энергии возбуждения от КТ к плазмонной наночастице, что в свою очередь может влиять на нелинейно-оптические свойства гибридных наноструктур.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-4408.2022.1.2.*

## ИССЛЕДОВАНИЯ НОВОГО ЛАЗЕРНОГО КРИСТАЛЛА $\text{Tm}^{3+}:\text{MgMoO}_4$

Ю. И. Зими́на<sup>1,2</sup>, К. А. Субботин<sup>1,2</sup>, А. И. Титов<sup>1,2</sup>, Д. А. Лис<sup>2</sup>,  
Я. С. Диденко<sup>1,2</sup>, G. Z. Elabedine<sup>3</sup>, К. Ereemeev<sup>4</sup>, R. M. Solé<sup>3</sup>, M. Aguiló<sup>3</sup>,  
П. А. Волков<sup>5</sup>, П. А. Попов<sup>6</sup>, F. Díaz<sup>3</sup>, P. Camy<sup>4</sup>, X. Mateos<sup>3</sup>, П. А. Лойко<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Россия, г. Москва,  
[yulia\\_zimina@inbox.ru](mailto:yulia_zimina@inbox.ru)*

<sup>2</sup>*Российский химико-технологический университет  
им. Д. И. Менделеева, Россия, г. Москва*

<sup>3</sup>*University of Rovira i Virgili, Spain, Catalonia, Tarragona*

<sup>4</sup>*Research Center on Ions, Materials and Photonics, France, Caen*

<sup>5</sup>*Институт химических реактивов и особо чистых химических веществ,  
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
Россия, г. Москва*

<sup>6</sup>*Брянский государственный университет им. академика  
И. Г. Петровского, Россия, г. Брянск*

Кристаллы  $\text{MgMoO}_4$ , легированные редкоземельными ионами, являются перспективными лазерными средами. Данная работа посвящена выращиванию и исследованию нового кристалла  $\text{Tm}^{3+}:\text{MgMoO}_4$ .

Кристалл выращивался методом Чохральского из расплава номинального состава  $\text{Mg}_{0.95}\text{Tm}_{0.05}\text{MoO}_4$ . Методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой была измерена фактическая концентрация  $\text{Tm}^{3+}$  в кристалле, составившая 0,1 ат.%. Таким образом, коэффициент сегрегации  $\text{Tm}^{3+}$  в кристалле можно оценить в 0,02. Методом высокотемпературного РФА определены коэффициенты линейного теплового расширения  $\text{Tm}:\text{MgMoO}_4$ . Теплопроводность кристалла  $\text{MgMoO}_4$  измерялась методом стационарного теплового потока вдоль оси  $c$ . В интервале температур от 50 до 300 К она монотонно уменьшается от 19,51 до 2,64 Вт·м<sup>-1</sup>К<sup>-1</sup>.

Поляризованные рамановские спектры  $b$ -среза кристалла  $\text{Tm}:\text{MgMoO}_4$  содержат интенсивные пики в диапазонах 122–424 см<sup>-1</sup> и 754–969 см<sup>-1</sup>. Кристалл имеет широкую, сильно поляризованную полосу излучения в диапазоне от 1,6 до 2,15 мкм. Измеренное время жизни возбужденного состояния  $^3\text{F}_4$  в кристалле  $\text{Tm}:\text{MgMoO}_4$  при 300 К составляет 1,972 мс. Из спектра поглощения кристалла получено пиковое сечение поглощения для перехода  $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{H}_4 \text{Tm}^{3+}$ , составившее  $1,6 \cdot 10^{-20}$  см<sup>2</sup> на длине волны 794,2 нм. Показано, что отжиг кристалла в парах  $\text{MoO}_3$  приводит к уменьшению интенсивности широкой полосы паразитного поглощения кристалла в диапазоне длин волн 350–600 нм.

Оптимизация технологии получения кристалла с более высокой концентрацией тулия позволит в дальнейшем провести лазерные генерационные эксперименты с данным кристаллом.

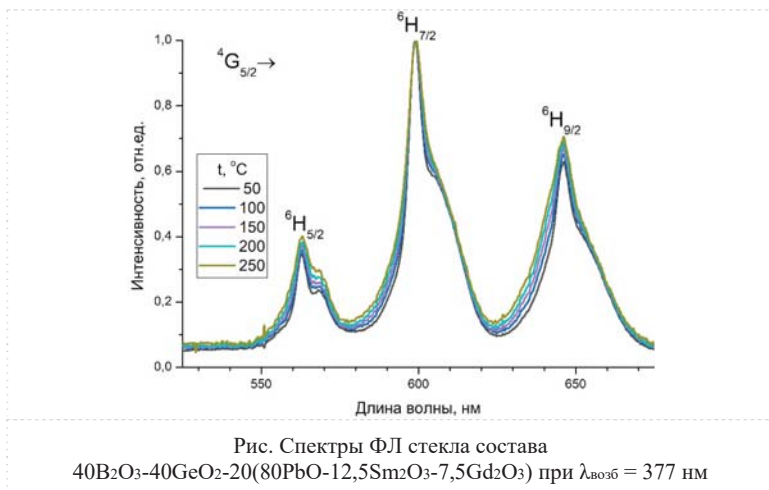
## ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА СВИНЦОВЫХ БОРОГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ, ЛЕГИРОВАННЫХ САМАРИЕМ И ГАДОЛИНИЕМ

С. С. Зыкова, К. С. Серкина, К. И. Рунина, О. Б. Петрова

Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева  
Россия, г. Москва, [zykova-sc@mail.ru](mailto:zykova-sc@mail.ru)

Методом высокотемпературной закалки расплава были синтезированы свинцовые борогерманатные стекла, легированные ионами самария и гадолиния. Синтезированные стекла имеют состав:  $40\text{B}_2\text{O}_3\text{-}40\text{GeO}_2\text{-}20(x\text{PbO-ySm}_2\text{O}_3\text{-}z\text{Gd}_2\text{O}_3)$ , где  $x = 75\text{--}85$ ;  $y = 10\text{--}15$ ;  $z = 5\text{--}10$  мол.%. Получен состав стекла с оптимальным содержанием и соотношением ионов  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$  и  $\text{Gd}^{3+}$ , обладающий термостабильной люминесценцией [1]. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) при возбуждении на 377 нм регистрировали на спектрофлуориметре Fluorolog FL3-22 в диапазоне длин волн 400–720 нм.

Полученные стекла демонстрируют широкий диапазон оранжево-красной люминесценции, характерной для  $\text{Sm}^{3+}$ , которая обусловлена переходами  ${}^4\text{G}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{H}_J$  ( $J = 5/2, 7/2, 9/2$ ) [1]. При нагреве образцов интенсивность полос ФЛ в диапазоне 550–580 и 620–680 нм увеличивается относительно полосы с максимумом на 600 нм.



### Литература

1. Y. Duan, X. Li, R. Shen, Y. Zhang, X. Wang, Z. Guan, K. Wang, Y. Cao, X. Zhang, B. Chen, *Mater. Res. Bull.*, 153, 111905 (2022).

## УЛУЧШЕНИЕ ОЦЕНКИ ДЛИНЫ СЕКРЕТНОГО КЛЮЧА В КАНАЛЕ СПУТНИК ЗЕМЛЯ

Е. И. Ивченко<sup>1,2,3,4</sup>, А. В. Хмелев<sup>1,2,3</sup>, В. Л. Курочкин<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Россия, г. Долгопрудный, [ivchenko.ei@phystech.edu](mailto:ivchenko.ei@phystech.edu)

<sup>2</sup>ООО «Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий»  
(Российский квантовый центр), Россия, г. Москва

<sup>3</sup>ООО «КьюСпейс Технологии», Россия, г. Москва

<sup>4</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
Россия, г. Москва

На сегодняшний день ведутся активные работы в области квантового распределения ключей (КРК), из-за невозможности шифровать данные классическими алгоритмами в ближайшем будущем, в силу угрозы со стороны квантового компьютера.

Существует два способа КРК. Первый из них использует оптоволокно для передачи квантовых состояний, второй способ это передача в свободном пространстве. Передача ключа с использованием оптоволоконных линий исследуется уже давно и довольно хорошо изучена [1]. Однако такой подход имеет ряд недостатков, в частности экспоненциальное затухание в таком канале, из-за чего сильно снижается возможная длина получаемой секретной последовательности [2]. Спутниковая связь возникла для решения этой проблемы, но, как и оптоволокна у этого подхода есть свои недостатки – ограниченное время передачи данных.

В данной работе проводится исследование и оптимизация длины секретной последовательности в зависимости от интервалов разбиения пролёта. Особое внимание уделяется экспериментальным данным [3; 4] в силу непостоянства атмосферных параметров канала и других статистических явлений.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (Стратегический проект «Квантовый Интернет»).*

### Литература

1. H.K. Lo, X. Ma, K. Chen, *Phys. Rev. Lett.*, 94(23), 230504 (2005).
2. S. Wang, Z.Q. Yin, D.Y. He et al., *Nat. Photonics*, 16(2), 154–161 (2022).
3. C.Y. Lu, Y. Cao, C.Z. Peng, J.W. Pan, *Rev. Mod. Phys.*, 94(3) 035001 (2022).
4. S.K. Liao, W.Q. Cai, W.Y. Liu et al., *Nature*, 549(7670), 43–47 (2017).

## ОПТИЧЕСКИЙ НАГРЕВ КРЕМНИЕВЫХ КАНТИЛЕВЕРОВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Э. А. Избасарова, С. С. Харинцев

*Казанский (Приволжский) федеральный университет,  
Россия, г. Казань, [Izbasarova.E.A@mail.ru](mailto:Izbasarova.E.A@mail.ru)*

В наше время очень актуальной и набирающей популярность областью является термофотоника, которая реализовывает высокоэффективный оптический нагрев наночастиц и наноструктур, а также управляет потоками тепла на наномасштабах. Такого рода технологии применяются в широком диапазоне задач, имеющих практическое значение, например: термо-ассистируемая магнитная запись информации, аналоговые вычисления, фототермическая терапия рака, биомедицина и детектирование локальных фазовых переходов. Тем не менее улучшение эффективности фототермического преобразования и пространственной локализации тепла является важной проблемой в данной области.

В данной работе освещается вопрос разработки механизмов локального фотонагрева, обеспечивающих высокоточное пространственное позиционирование и контроль температуры в режиме реального времени. Для достижения этой цели было проведено исследование оптического нагрева кончиков Si кантилеверов, которые широко применяются в сканирующей тепловой зондовой микроскопии. В результате эксперимента было установлено, что 10–30 нанометровый кончик кремниевого зонда может нагреваться на несколько сотен градусов при средней лазерной накачке ( $5 \text{ МВт/см}^2$ ). Для определения температуры нагрева использовался метод рамановской термометрии. Для более детального анализа механизмов аномального фотонагрева было проведено численное моделирование. Анализ результатов показал, что аномальный оптический нагрев может быть обусловлен возбуждением Ми резонансов.

На следующем этапе планируется исследовать механизмы поглощения и теплопередачи кремниевых зондов, находящихся в контакте с исследуемым образцом. В дальнейшем полученные данные будут использованы для разработки методов детектирования фазовых переходов в сильно неоднородных материалах с нанометровым пространственным разрешением.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-12-00066, <https://rscf.ru/project/19-12-00066/>.*



## ОПЫТ РАСЧЁТА УСИЛЕНИЯ И ПОТЕРЬ ДЛЯ ИСКУССТВЕННОГО АЛМАЗА С NV-ЦЕНТРАМИ

Д. Е. Генин<sup>1,2</sup>, И. В. Измайлов<sup>2</sup>, Е. И. Липатов<sup>1,2</sup>, А. В. Лячин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, г. Томск,  
[dm\\_genin@vtomske.ru](mailto:dm_genin@vtomske.ru)*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г. Томск, [izmil@mail.ru](mailto:izmil@mail.ru)*

Среди новых источников излучения на кристаллах с центрами окраски, создаваемыми радиационно-лучевыми технологиями, перспективен искусственный алмаз с NV-центрами. Впервые генерация на NV-центрах была получена в 2021 г. Ещё нет конвенциональной технологии получения этих лазерных сред, обеспечивающей желаемые генерационные свойства среды и лазера на её основе. Поэтому актуален способ оценки натуральных показателей ненасыщенного коэффициента усиления  $K_0$  и вредных потерь  $T$  в среде. И тогда возможна оптимизация коэффициентов отражения зеркал  $R_1R_2$ . Предлагаемый расчёт опирается на экспериментальные данные и выполнен в приближениях: 1) фотонной модели, 2) стационарной генерации лазерного излучения, 3) четырёхуровневой схемы центра люминесценции, 4) мгновенной релаксации нижнего лазерного уровня, 5) лоренцева контура однородно уширенной линии излучения, 6) отсутствия насыщения поглощения энергии импульса накачки, 7) преобладания дифракционных потерь излучения над остальными. В границах этих приближений предложен способ оценки величин параметров лазерной среды и резонатора, образованного гранями кристалла. Для исследованного образца алмаза расчёт дал оценки:  $K_0 \leq 65,1 \text{ см}^{-1}$ , наиболее вероятное значение  $T = 0,029 \text{ см}^{-1}$  (включая дифракционные). Эти величины  $K_0$ ,  $T$  есть некие средние (эффективные для импульсного режима) значения  $K_0$ ,  $T$  искомым параметров, пригодные для оценки оптимальных коэффициентов  $(R_1R_2)_{\text{опт}}$ . Они варьируют от 0,546 до 0,071 при изменении  $K_0$  от порогового значения до максимального. Расчёт предполагает, в частности: 1) на основе данных эксперимента установление связи между значением ненасыщенного коэффициента усиления  $K_0$  и величиной вредных потерь  $T$ ; 2) оценку  $K_0$ , основанную на учёте значений параметров кристалла и условий возбуждения, оценке эффективности поглощения энергии накачки; 3) вычисление  $T$  на основе данных, полученных в п. 1 и 2.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (Образование РФ, проект № 0721-2020-0048).*

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МОБИЛЬНОСТЬ ЗАРЯДОВ В ДОНОРНО-АКЦЕПТОРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ДИБЕНЗТИОФЕНОВ С КОНФОРМАЦИОННЫМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ

Н. В. Измайлова, Л. Г. Самсонова, К. М. Дегтяренко

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г. Томск, [izmailova.sfti@gmail.com](mailto:izmailova.sfti@gmail.com)*

Исследованы люминесцентные свойства при фото- и электровозбуждении соединений, состоящих из электроно-донорных (дифениламинов) и электрон-акцепторных (дибензтиофенов) фрагментов, отличающихся конформационным расположением в молекуле и периферийными заместителями (рис.).

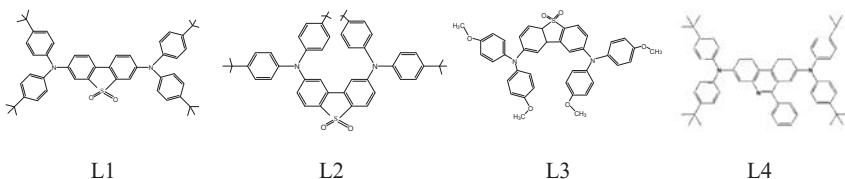


Рис. Структурные формулы исследованных соединений.

Соединения исследованы на предмет реализации в них термально-активированной замедленной флуоресценции, что важно для повышения эффективности работы светоизлучающих диодов на основе органических соединениях (OLED). Изготовлены OLED структуры на основе L1-L4 и изучены их вольт-амперные, вольт-яркостные, люминесцентные свойства. Показано полное совпадение спектров электролюминесценции с флуоресценцией пленок L1-L4, полученных термовакuumным осаждением.

Методом переходной люминесценции исследованы подвижности носителей заряда в ячейках OLED. В органических полупроводниках подвижность дырок выше подвижности электронов [1]. Оценка подвижности носителей зарядов (дырок), проведённая по методике [2], составила величину  $\sim 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/В·с.

### Литература

1. М.Н. Бочкарев, А.Г. Витухновский, М.А. Каткова. Органические светоизлучающие диоды (OLED). Н. Новгород: Деком, 2011. 360 с.
2. D.J. Pinner, R.H. Friend, N. Tessler, *J. Appl. Phys.*, 86(9), 5116–5130 (1999).

## УСИЛЕНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ЗЕЛЕННОГО ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО БЕЛКА, ВОЗБУЖДАЕМОЙ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

С. А. Вьюнышева<sup>1</sup>, С. А. Мысливец<sup>1,2</sup>, Н. Н. Давлетшин<sup>1,2</sup>,  
Д. А. Иконников<sup>1</sup>, Е. В. Еремеева<sup>3</sup>, Е. С. Высоцкий<sup>3</sup>, И. Н. Павлов<sup>4</sup>,  
А. М. Вьюнышев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН – обособленное подразделение  
ФИЦ КНЦ СО РАН, Россия, г. Красноярск, [ikonnikov@iph.krasn.ru](mailto:ikonnikov@iph.krasn.ru)

<sup>2</sup>Институт инженерной физики и радиоэлектроники,  
Сибирский федеральный университет, Россия, г. Красноярск

<sup>3</sup>Институт биофизики СО РАН – обособленное подразделение  
ФИЦ КНЦ СО РАН, Россия, г. Красноярск

<sup>4</sup>Институт леса им. В. Н. Сукачева – обособленное подразделение  
ФИЦ КНЦ СО РАН, Россия, г. Красноярск

В последнее время достигнут значительный прогресс в развитии флуоресцентных методов анализа. Для изучения биологических систем широко применяется метод лазерно-индуцированной флуоресценции, позволяющий повысить полезный сигнал путем селективного возбуждения флуорофора. Усиление флуоресценции в системах, обладающих слабовыраженными люминесцентными свойствами или с низкой концентрацией флуорофора в образце, позволит снизить предел обнаружения биомаркеров [1]. В молекулярной биологии для исследования структуры и функции нуклеиновых кислот и белков широко применяется зеленый флуоресцентный белок (GFP) в качестве флуоресцентной метки [2].

В данной работе использовался раствор *sgreGFP*, характеризующийся максимумом поглощения на 488 нм и пиком флуоресценции в диапазоне 510–525 нм. Раствор белка помещался в микрорезонатор Фабри-Перо. Оптическая накачка осуществлялась фемтосекундным излучением (400 нм). В эксперименте наблюдалось свечение раствора в микрорезонаторе, а при увеличении мощности накачки сигнал флуоресценции усиливался на частотах, соответствующих резонаторным модам.

В результате работы получено усиление флуоресценции GFP в микрорезонаторе. Эффективность биотестов может быть улучшена путем увеличения соотношения сигнал/шум, что приведет к обнаружению биомаркеров в самых низких концентрациях.

### Литература

1. A. Pokhriyal, M. Lu, C. Ge, B.T. Cunningham, *J. Biophotonics*, 7, 332–340 (2014).
2. O. Shimomura, F.H. Johnson, Y. Saiga, *J. Cell. Physiol.*, 59, 223–239, (1962).

## ДИФРАКЦИЯ ФРЕНЕЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ НА ВИЛКООБРАЗНОЙ РЕШЕТКЕ

Д. А. Иконников, С. А. Мысливец, В. Г. Архипкин, А. М. Вьюнышев

*Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН – обособленное подразделение  
ФИЦ КНЦ СО РАН, Россия, г. Красноярск, [ikonnikov@iph.krasn.ru](mailto:ikonnikov@iph.krasn.ru)*

Структурированный свет привлекает большой интерес ученых в особенности на протяжении последних 20 лет [1]. Одним из примеров структурированного света являются оптические вихри (ОВ). Оптические вихри представляют собой свет, поле которого имеет вид  $(x + iy)^l \equiv A e^{i l \varphi}$ , где  $l$  – топологический заряд,  $\varphi$  – азимутальный угол, наличие азимутальной зависимости придает волновому фронту геликоидальную форму. Геликоидальный волновой фронт приводит к кольцевидному распределению интенсивности и оптической (фазовой) сингулярности в центре ОВ, где оптическая фаза не определена, а интенсивность поля стремится к нулю. Такие пучки нашли применение во многих областях, таких как квантовые коммуникации, сверхъёмкая передача информации, микроскопия сверхвысокого разрешения и оптические манипуляции [1]. Для создания оптических вихрей часто используются вилкообразные решетки (ВР) [2]. ВР имеют точечный дефект, нарушающий периодичность регулярной структуры, что приводит к формированию пучков ОВ в порядках дифракции в дальнем поле дифракции [3]. Топологические заряды ОВ зависят от порядка дифракции и топологического заряда падающего пучка.

В данной работе была теоретически и экспериментально исследована ближнепольная дифракция оптических вихрей видимого диапазона на вилкообразных решетках. Показано, что оптические сингулярности демонстрируют сложные пространственные распределения в ближней зоне дифракции, что нарушает регулярность пространственных распределений интенсивности, известных как ковры Тальбота.

*Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 19-12-00203-П).*

### Литература

1. A. Forbes, M. de Oliveira, M.R. Dennis, *Nat. Photonics*, 15, 253–262 (2021).
2. V.Y. Bazhenov, M.V. Vasnetsov, M.S. Soskin, *JETP Lett.*, 52, 429–431 (1991).
3. D.A. Ikonnikov, V.A. Fokin, A.M. Vyunishev, *Ann. Phys.*, 534, 2200041 (2022).

## КИНЕТИКА ЛАЗЕРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ АТОМОВ В БИХРОМАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Р. Я. Ильенков<sup>1</sup>, О. Н. Прудников<sup>1,2</sup>, А. А. Кирпичникова<sup>1</sup>,  
А. В. Тайченачев<sup>1,2</sup>, В. И. Юдин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт лазерной физики СО РАН, Россия, г. Новосибирск, [info@laser.nsc.ru](mailto:info@laser.nsc.ru)

<sup>2</sup>Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,  
Россия, г. Новосибирск

Лазерное охлаждение атомов в настоящее время используется для широкого спектра современных научных исследований, в частности для создания современных оптических стандартов частоты [1].

В данной работе авторы исследуют особенности кинетики лазерного охлаждения атомов в бихроматическом поле. На примере реальной структуры атомов лития-6, подробно исследованы силы, воздействующие на атом в бихроматическом поле. Получены и описаны зоны параметров, в которых охлаждение принципиально достижимо и показана возможность охлаждения атомов ниже доплеровского предела (рис.).

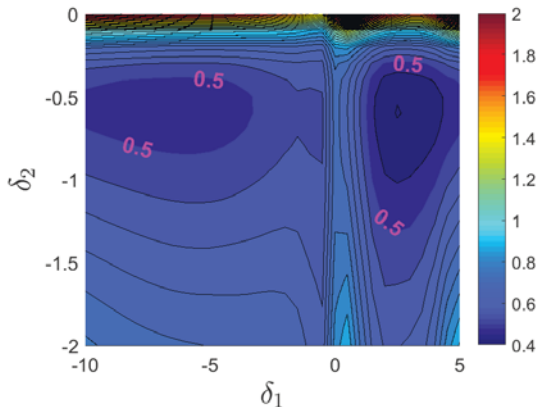


Рис. Величина  $k_B T_{eff} = \langle p^2/M \rangle$  в единицах  $\hbar\nu$  для оптимальной поляризационной конфигурации охлаждающих световых полей

Полученные стационарные решения для импульсного распределения атомов лития не соответствуют гауссовому, следовательно, не могут быть описаны в терминах температуры [2].

*Работа поддержана грантом Российского научного фонда (проект № 23-12-00182).*

### Литература

1. A.V. Taichenachev, V.I. Yudin, S.N. Bagaev, *Phys. Usp.*, 59(2), 184–195 (2016).
2. O.N. Prudnikov, A.V. Taichenachev, V.I. Yudin, *JETP Lett.*, 102, 576–580 (2015).

## ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ, СОДЕРЖАЩИХ НАНОРАЗМЕРНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КЛАСТЕРЫ, В ЦГК

В. П. Дресвянский<sup>1,2</sup>, А. С. Ищенко<sup>3</sup>, Е. Ф. Мартынович<sup>1,2</sup>,  
А. А. Черных<sup>2</sup>, В. Л. Паперный<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН, Россия, г. Иркутск

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, Россия, г. Иркутск

<sup>3</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения,  
Россия, г. Иркутск, [nadvp@list.ru](mailto:nadvp@list.ru)

В докладе будет представлен краткий обзор полученных нами результатов исследований спектрально-люминесцентных свойств поверхностных слоев наноразмерных металлических кластеров в кристаллах LiF, KCl и NaCl, синтезированных методом ионной имплантации в результате облучения исследуемых образцов ионами Au, Ag и Cu.

Образцы исследуемых кристаллов облучались потоком ионов металла, создаваемым компактным импульсным имплантером MEVVA.RU, с плотностью потока в диапазоне  $2 \cdot 10^{13}$ – $10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> и энергией 150 кэВ.

Спектры поглощения кристаллов фторида лития, подвергшихся сильному воздействию облучения около  $10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>, показывают несколько полос с максимумами поглощения при 250 нм, 441 нм и 400 нм. Первая и вторая полосы отвечают за поглощение центров окраски F и F<sub>2</sub> (F<sub>3</sub><sup>+</sup>) соответственно. В результате отжига образца до температуры 673 К агрегатные центры полностью исчезают, и в спектре поглощения наблюдается термостабильная полоса поверхностного плазмонного резонанса с максимумом на 400 нм, возникающая за счет образования наночастиц серебра из внедренных ионов.

Спектры излучения кристаллов фторида лития при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 375 нм показали, что наряду с полосой люминесценции с максимумами при 530 и 680 нм обнаруживается полоса люминесценции с максимумом при 460 нм. Первая и вторая полосы характерны для люминесценции центров окраски F<sub>3</sub><sup>+</sup> и F<sub>2</sub> соответственно. Третья полоса возникла в результате коалесценции внедренного иона серебра с некоторыми частицами. Измерения кинетики люминесценции выявили четыре времени затухания, а именно 13,5 и 5,2 нс, близкие к характерным временам затухания центров люминесценции F<sub>2</sub> и F<sub>3</sub><sup>+</sup> в кристалле LiF. Также были обнаружены две быстрые компоненты с временами затухания около 0,2 и 1,0 нс, которые были отнесены к люминесценции наночастиц серебра. Соотношение пиков интенсивности люминесценции центров окраски и наночастиц серебра существенно зависит от флюенса ионов.

В результате проведенных исследований показано, что облучение исследуемых кристаллов ионами Au, Ag и Cu приводит к образованию не-

скольких типов центров люминесценции в поверхностном слое кристаллической матрицы, связанных как с радиационными центрами окраски, так и с флуоресценцией молекулярных нанокластеров имплантируемых металлов.

*Работа выполнена в рамках Плана фундаментальных исследований РАН на период до 2025 г., проект № 0243-2021-0004.*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕКЛОВАНИЯ ОЛИГОМЕРНЫХ И ПОЛИМЕРНЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

А. В. Казанцева, С. С. Харинцев

*Казанский (Приволжский) федеральный университет,  
Россия, г. Казань, [nastykazantseva13@gmail.com](mailto:nastykazantseva13@gmail.com)*

Двухфотонная полимеризация прямой лазерной записи является методом позволяющим создавать трёхмерные микроструктуры различного архитектурного дизайна с поразительной точностью. Подобные объекты возможно использовать в различных областях, например, при синтезе микрофлюидных чипов и биосенсоров. В данной работе был проведен сравнительный анализ температуры стеклования олигомерной и полимерной структур с помощью метода термометрии комбинационного рассеяния света.

Объектом исследования являлись двухфотонно-полимеризованные одномерные полимерные дорожки длиной 22 мкм и высотой 800 нм на олигомерной подложке. Спектры КР были получены с помощью многоцелевого аналитического прибора NTEGRA SPECTRA™ в вертикальной конфигурации. Спектры в диапазоне 200–2000 см<sup>-1</sup> регистрировались при использовании дифракционной решетки 600 штрих/мм<sup>-1</sup> со спектральным разрешением 1,3 см<sup>-1</sup>. Образец был помещен на нагревательный столик, работающий в диапазоне 20–150 °С. Измерили по 25 КР-спектров олигомерного и полимерного объектов при нагреве с шагом 5 °С. В связи с тем, что исследуемый объект расширялся при нагреве, возникла необходимость контролировать фокусировку лазерного луча. Для решения данной проблемы была создана система, поддерживающая отрицательную обратную связь на основе отражения.

Температура стеклования – это всегда диапазон температур. По скачку интенсивности, окраске в теплые тона, отслеживали температуру стеклования (ТС). Обнаружили, что в результате полимеризации температура стеклования выросла с 60–65 °С, локальная ТС олигомера, до 90–104 °С, локальная ТС полимерного материала. Таким образом, благодаря термометрии комбинационного рассеяния света, удалось зафиксировать локальную температуру стеклования вещества.

Полученные результаты могут быть использованы при создании микрофлюидных ячеек, каналов и клапанов для реализации компактных биосенсоров.

## ИЗМЕРЕНИЕ МАЛЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ ТРИБОРТА ЛИТИЯ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1070 НМ

Д. Д. Казаринова<sup>1</sup>, А. В. Коняшкин<sup>2</sup>, О. А. Рябушкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Россия, г. Долгопрудный, [kazarinova.dd@phystech.edu](mailto:kazarinova.dd@phystech.edu)

<sup>2</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В. А. Котельникова РАН, Россия, г. Фрязино

Коэффициенты оптического поглощения  $\alpha$  трёх кристаллов трибората лития LBO ( $3,0 \times 3,3 \times 20,0$  мм<sup>3</sup>) на длине волны 1070 нм были измерены новым методом акусто-резонансной лазерной калориметрии (АЛК). В основе метода АЛК лежит использование температурной зависимости частот собственных колебательных мод образца для измерения кинетики его разогрева лазерным излучением. Исследуемый кристалл располагается на двух узких пьезоэлектрических элементах (рис.). Пьезоэлемент, подключенный к радиочастотному (РЧ) генератору, возбуждает в образце акустические волны. Отклик регистрируется вторым пьезоэлементом с использованием синхронного детектирования. Предварительно производится температурная калибровка резонансных частот в условиях однородного разогрева. Из решения уравнения теплопроводности:  $\alpha = mc_{sp}k/(lPK_n^{art})$ , где  $m$ ,  $c_{sp}$  и  $l$  – масса, удельная теплоемкость и длина образца,  $P$  – мощность излучения,  $k$  – тангенс угла наклона начального линейного участка кинетики температуры. Результаты измерений в сравнении с коэффициентами  $\alpha$ , полученными методами фототермической однолучевой интерферометрии ( $\alpha_{FTI}$ ) [1] и лазерной калориметрии ( $\alpha_{LK}$ ) [2], представлены в таблице.

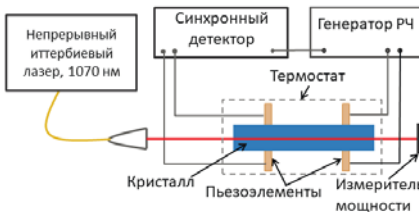


Рис. Упрощенная блок-схема экспериментальной установки АЛК

Таблица  
Коэффициенты оптического поглощения LBO

№	$\alpha_{АЛК} \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$	$\alpha_{FTI} \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$	$\alpha_{LK} \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$
1	1,9±0,3	2,3±0,9	2,1±0,5
2	1,1±0,3	1±0,4	1,8±0,4
3	1,2±0,3	1±0,4	0,8±0,2

Исследования выполнены в рамках темы госзадания.

### Литература

1. A. Alexandrovski, M. Fejer, A. Markosian, R. Route, *Proc. SPIE*, 7193, 71930D (2009).
2. U. Willamowsky, D. Ristau, E. Welsh, *Appl. Opt.*, 37(36), 8362–8370 (1998).



## ИЗУЧЕНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ В ФОТОНИКЕ

К. Р. Каримуллин<sup>1,2,3</sup>, А. И. Аржанов<sup>1,2,3</sup>, К. А. Магарян<sup>2</sup>,  
А. О. Савостьянов<sup>1</sup>, А. В. Наумов<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт спектроскопии РАН, Россия, г. Троицк, [kamil@isan.troitsk.ru](mailto:kamil@isan.troitsk.ru)

<sup>2</sup>Московский педагогический государственный университет, Россия, г. Москва

<sup>3</sup>Троицкое обособленное подразделение Физического института  
им. П. Н. Лебедева РАН, Россия, г. Троицк

Полупроводниковые квантовые точки (КТ) и композитные материалы на их основе широко используются в современной науке и технологиях благодаря своим уникальным свойствам. Высокая фотостабильность и квантовый выход люминесценции, а также возможность варьирования спектральных параметров КТ в широких пределах, обуславливают их использование в различных приложениях фотоники.

В докладе представлен обзор работ, посвященных методам синтеза и исследованиям фотофизических свойств КТ. Обсуждаются фундаментальные закономерности, связывающие морфологию КТ с их люминесцентными свойствами, механизмы квантово-размерного эффекта, электрон-фононное взаимодействие, эффекты локального поля, мерцание фотолюминесценции одиночных КТ. Проанализированы результаты оригинальных экспериментальных и теоретических исследований температурных зависимостей параметров спектров люминесценции полупроводниковых коллоидных КТ с излучающим ядром селенида кадмия [1] с целью исследования электрон-фононного взаимодействия в нанокompозитах с КТ [2]. Обсуждаются различные приложения КТ в таких областях современных фотонных технологий как оптоэлектроника, биофизика, квантовая оптика, сенсорика и фотовольтаика [3].

*Авторы входят в состав Ведущей научной школы Российской Федерации (грант Президента РФ НШ-776.2022.1.2). Исследование выполнено в рамках темы государственного задания Московского педагогического государственного университета (МПГУ) «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нанотехнологиях и фотонике» при поддержке Министерства просвещения Российской Федерации (AAAA-A20-120061890084-9).*

### Литература

1. А.И. Аржанов, А.О. Савостьянов, К.А. Магарян, К.Р. Каримуллин, А.В. Наумов, *Фотоника*, 15(8), 622–641 (2021).
2. К.Р. Каримуллин, А.И. Аржанов, Н.В. Суровцев, А.В. Наумов, *Опт. и спектр.*, 130(1), 146–150 (2022).
3. А.И. Аржанов, А.О. Савостьянов, К.А. Магарян, К.Р. Каримуллин, А.В. Наумов, *Фотоника*, 16(2), 96–113 (2022).

## ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ БИХРОМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЛАЗЕРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ АТОМОВ ${}^6\text{Li}$

Р. Я. Ильенков, А. А. Кирпичникова, О. Н. Прудников

*Институт лазерной физики СО РАН  
Россия, г. Новосибирск, [info@laser.nsc.ru](mailto:info@laser.nsc.ru)*

Развитие эффективных методов лазерного охлаждения атомов стимулируется исследованиями в таких современных направлениях как квантовые сенсоры на атомных интерферометрах (гироскопы, гравиметры и акселерометры); Бозе-конденсаты; квантовые компьютеры; оптические стандарты частоты, используемых для навигационных систем и фундаментальных исследований.

Поиск оптимальных параметров для конкретных реализаций остаётся актуальной задачей, несмотря на хорошо развитые методы лазерного охлаждения и их теоретическое описание. Полный учёт эффектов отдачи показал, что известная картина субдоплеровского охлаждения применима только для экстремально малых параметров отдачи [1]. При охлаждении атома  $\text{Li}$  это условие нарушается, и эффекты отдачи становятся существенными. Среди щелочных металлов  $\text{Li}$  является лучшим кандидатом как для исследования квантовых эффектов, возникающих при экстремально низких температурах, так и для сравнения поведения бозонов и фермионов, так как он имеет стабильные изотопы, как с целыми, так и с полужелыми ядерными спинами:  ${}^6\text{Li}$  ( $I = 1$ ) и  ${}^7\text{Li}$  ( $I = 3/2$ , 92,5 %). Сверхтонкое расщепление уровней возбужденного состояния оптических переходов  $D_2$  линии мало по сравнению с естественной шириной линии, что не позволяет выделить замкнутый оптический переход и затрудняет описание стандартными моделями. Таким образом, охлаждение и захват атомов является сложным для реализации процессом [2]. На данный момент большинство исследователей использует симпатический метод охлаждения атомов  $\text{Li}$  в магнитооптической ловушке, что накладывает определённые ограничения на использование атомов в дальнейшем, так как буферные атомы сложно полностью извлечь из ловушки [3].

В нашей работе рассматриваются различные схемы лазерного охлаждения атомов  ${}^6\text{Li}$  в монохроматических полях различной поляризационной конфигурации с учетом сверхтонкой энергетической структуры атома.

*Работа была поддержана грантом РФФ (№ 23-22-00198).*

### Литература

1. А.А. Кирпичникова., О.Н. Прудников, Р.Я. Ильенков, А.В. Тайченачев, В.И. Юдин, *Квант. электрон.*, 50(10), 939–946 (2020).
2. Z. Lin, K. Shimizu, M. Zhan, F. Shimizu, H. Takuma, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 30 (7B), L1324 (1991).
3. Z. Hadzibabic, C.A. Stan, K. Dieckmann, S. Gupta, M.W. Zwierlein, A. Görlitz, W. Ketterle, *Phys. Rev. Lett.*, 88, 160401 (2002).

## НАНОСЛОЙ КРЕМНИЯ, СВЕРХЛЕГИРОВАННЫЙ ЗОЛОТОМ: ЛАЗЕРНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И КОНЕЧНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА

М. С. Ковалев, С. И. Кудряшов

*Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН,  
Россия, г. Москва, [m.s.kovalev@gmail.com](mailto:m.s.kovalev@gmail.com)*

Обнаружено, что кремний (Si), сверхлегируемый золотом, поглощает свет в ближней инфракрасной области электромагнитного спектра. Несмотря на то что сейчас производятся кремниевые фотоприемники этого диапазона, их эффективность невелика [1; 2]. В настоящем исследовании мы провели наносекундное и пикосекундное лазерное сверхлегирование тонких аморфных пленок Si с использованием композиционной, химической, структурной и ИК-спектроскопической характеристики. Мы продемонстрировали несколько перспективных режимов лазерного сверхлегирования кремния золотом и сравнили их. Результаты показали, что оптимальная эффективность материалов, легируемых примесями Si, еще не достигнута, и мы обсуждаем возможности дальнейшего исследования в свете наших результатов.

### Литература

1. S.I. Kudryashov, A.A. Nastulyavichus, G.K. Krasin et al., *Opt. Laser Technol.*, 158A, 108873 (2023).
2. S.I. Kudryashov, K.N. Boldyrev, A.A. Nastulyavichus et al., *Opt. Mater. Express*, 11(11), 3792–3800 (2021).

## МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ

И. Е. Колесников, Д. В. Мамонова, М. А. Курочкин

*Санкт-Петербургский государственный университет,  
Россия, г. Санкт-Петербург, [ilya-kolesnikov@mail.ru](mailto:ilya-kolesnikov@mail.ru)*

Температура является одним из наиболее часто измеряемых физических параметров во всех природных и инженерных системах от атомного до макроскопического уровней. В большинстве традиционных термометров определение температуры осуществляется посредством теплового контакта объекта и зонда. Однако необходимость непосредственного контакта с объектами делает такие датчики непригодными для проведения измерений в сложных условиях (например, микро- и наноразмерные объекты, сильные электромагнитные поля, коррозионные среды). Быстрое развитие микроэлектроники и биомедицины значительно ускорили появление бесконтактных и неинвазивных методов термометрии с высоким

пространственным и температурным разрешением. Люминесцентная термометрия является одним из наиболее перспективных бесконтактных термометрических методов благодаря быстрому отклику, высокому пространственному и тепловому разрешению. Основным принципом функционирования люминесцентной термометрии является зависимость параметров люминесцентного излучения объекта от его температуры.

В данной работе в качестве люминесцентных термометров были успешно продемонстрированы оксидные наночастицы, легированные редкоземельными ионами ( $YVO_4:Eu^{3+}$ ,  $Y_2O_3:Nd^{3+}$ ). Уникальные спектроскопические свойства редкоземельных ионов позволяют использовать их люминесцентные параметры, такие как соотношение интенсивностей полос излучения, спектральное положение люминесцентных линий и ширина полос люминесценции в температурно-чувствительных для построения калибровочных кривых и определения локальной температуры. Возможность отслеживания нескольких температурно-чувствительных параметров в одном люминофоре (мультипараметрическая термометрия) приводит к повышению надежности температурного мониторинга и расширению рабочего диапазона по сравнению с обычными тепловыми датчиками.

*Работа поддержана грантом РФФИ (21-79-10018). Эксперименты выполнены на оборудовании ресурсных центров «Оптические и лазерные методы исследования вещества», «Рентгенодифракционные методы исследования» и «Нанотехнологии» (Научный парк СПбГУ).*

## **ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И ФИЛАМЕНТАЦИЯ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В АЛМАЗЕ**

Г. К. Красин, С. И. Кудряшов

*Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН  
Россия, г. Москва, [krasin.georg@gmail.com](mailto:krasin.georg@gmail.com)*

Среди параметров лазерного излучения, влияющих на нелинейно-оптическое взаимодействие с кристаллическими диэлектриками, важное значение, наряду с длиной волны и энергией, может иметь лазерная поляризация [1]. В данной работе проводилось исследование эффектов объемного фотовозбуждения в природном и синтетическом алмазах лазерными импульсами ближнего и ИК-диапазона с варьируемым азимутом поляризации [2]. В результате полученные значения интенсивности фотолюминесценции демонстрировали азимутальные зависимости, совпадающие с определенными кристаллографическими направлениями и соответствующими ширинами запрещенной зоны в зоне Бриллюэна. Выход фотолюминесценции и пороговая мощность филаментации демонстрировали наиболее выраженный азимутальный характер лишь в области низких энергий

лазерных импульсов. Тогда как в области более высоких энергий зависимости имеют практически изотропный характер (относительно поляризации лазера), предположительно связанный с поглощающими свойствами образующейся плотной плазмы. Аналогичные азимутальные зависимости были получены также для поверхностной абляции ориентированных пластин алмаза.

*Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 21-79-30063).*

### Литература

1. G.K. Krasin, M.S. Kovalev, S.I. Kudryashov, P.A. Danilov, V.P. Martovitskii, I.V. Gritsenko, I.M. Podlesnykh, R.A. Khmelnskiy, E.V. Kuzmin, Y.S. Gulina, A.O. Levchenko, *Appl. Surf. Sci.*, 595, 153549. (2022).
2. G.K. Krasin, Y.S. Gulina, E.V. Kuzmin, V.P. Martovitskii, S.I. Kudryashov, *Photonics*, 10(2), 106 (2023).

## ФЛУКТУИРУЮЩАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ОДИНОЧНОГО X-ЦЕНТРА В КРИСТАЛЛЕ LiF

Н. Д. Кривошеев, С. А. Зилов, В. П. Дресвянский, Е. Ф. Мартынович

*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН,  
Россия, г. Иркутск, [post@lph.irk.ru](mailto:post@lph.irk.ru)*

При исследовании одиночных центров окраски методом конфокальной флуоресцентной микроскопии в изотропных кристаллах LiF выращенных в графитовом тигле методом Стокбаргера-Бриджмена, были обнаружены необычные зависимости интенсивности их люминесценции от времени (по сравнению с динамикой центров окраски, которые мы ранее наблюдали), данные центры не были обнаружены ранее, так как имеют схожий с F<sub>2</sub> спектр люминесценции и поглощения. Этот центр будем обозначать как X. Таким образом, при регистрации интенсивности от времени (квантовой траектории) X центра через параллельно ориентированный поляризатор (относительно вектора напряженности электрического поля лазерного излучения), мы фиксируем падение интенсивности в два раза, при ориентации образца как в положении 0° (рис. 1) так и 45° (рис. 2).

На рис. 1 и 2 видно, что интенсивность оп-интервалов до поляризатора и после поляризатора падает в 2 раза, эта особенность наблюдается на всех измеренных квантовых траекториях, что не соответствует F<sub>2</sub> центру [1; 2]. Анализ полученных зависимостей, показывает, что ни один возможный центр в кубической решётке не может соответствовать таким траекториям. Поэтому можно сделать вывод, что в данном центре происходит быстрая деполяризация люминесценции за время меньше, чем время жизни его возбужденного состояния порядка 17 нс. Так же нами была

предложена структурная модель X-центра окраски, проведён статистический анализ и разработано программное обеспечение для анализа off-интервалов.

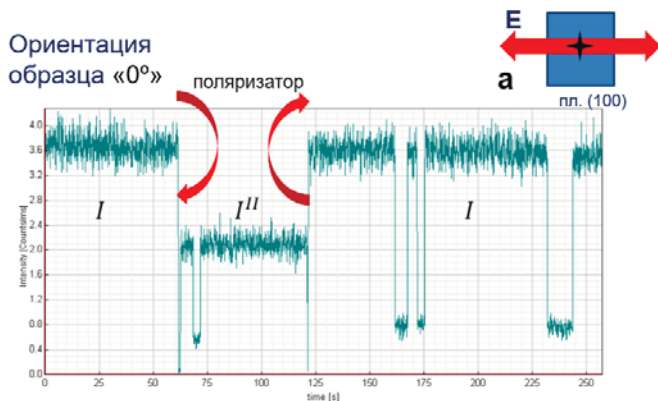


Рис. 1. Интенсивность люминесценции X-центра от времени. При вводе поляризатора интенсивность падает в 2 раза. Ориентация  $0^\circ$ . Точка ввода поляризатора; Точка вывода поляризатора

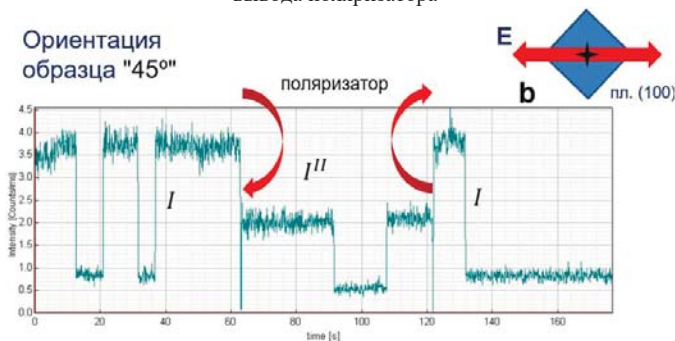


Рис. 2. Интенсивность люминесценции X-центра от времени. При вводе поляризатора интенсивность падает в 2 раза. Ориентация  $45^\circ$ . Точка ввода поляризатора ; Точка вывода поляризатора

*Работа поддержана научным проектом 0243-2021-0004 в рамках плана фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 г.*

#### Литература

1. С.А. Зилов, А.П. Войтович, С.В. Бойченко, А.В. Кузнецов, В.П. Дресвянский, А.Л. Ракевич, А.В. Баргуль, К. Кениг, Е.Ф. Мартынович, *Изв. РАН Сер. физ.*, 80(1), 89–92 (2016).
2. В.П. Дресвянский, С.В. Бойченко, С.А. Зилов, А.Л. Ракевич, А.П. Войтович, Е.Ф. Мартынович, *Изв. РАН Сер. физ.*, 80(1), 97–100 (2016).

## СЦИНТИЛЯЦИОННЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ НАНОЧАСТИЦЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ГОРЕНИЯ В РАСТВОРАХ

И. В. Крутикова<sup>1</sup>, К. В. Нефедова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт электрофизики УрО РАН, Россия,  
г. Екатеринбург, [ivjukhina@iep.uran.ru](mailto:ivjukhina@iep.uran.ru)

<sup>2</sup>Институт химии твердого тела УрО РАН, Россия, г. Екатеринбург, [nefedova@ihim.uran.ru](mailto:nefedova@ihim.uran.ru)

Наноструктурированный оксид иттрия ( $Y_2O_3$ ) обладает высоким светопропусканием в видимой и ИК-области спектра, высокой термо- и химической стойкостью и является перспективным материалом для твердотельных лазеров, люминофоров и сцинтилляторов [1]. В качестве активаторов для обеспечения быстрого и эффективного свечения сцинтилляторов применяется церий ( $Ce^{4+}$ ), в котором разрешенные переходы 5d-4f работают как радиационные [2]. Неравномерность распределения легирующих примесей в керамических материалах может вызвать сегрегацию активатора на границах зерен и образовывать дефекты, которые часто ведут себя как ловушки или каналы для безызлучательной релаксации энергии. Они уменьшают быстродействующую люминесцентную составляющую и общий световой выход по сравнению с монокристаллом. Использование наноразмерных частиц при спекании керамического материала может снизить оптические потери в керамике [3] и температуру спекания, что позволит получать керамику с субмикронным размером зерна. В настоящей работе проведены эксперименты по получению нанопорошков  $Y_2O_3$ , допированных ионами  $Ce^{4+}$ , методом горения в растворах с применением глицина / (глицина и лимонной кислоты) в качестве восстановителя/топлива. С помощью методов РФА, СЭМ, БЭТ, ИК-Фурье спектроскопии были исследованы структурные и морфологические свойства полученных наночастиц. Показано, что метод горения в растворах можно успешно использовать для синтеза сцинтилляторных керамических наночастиц оксидов металлов. Результаты экспериментов представлены в презентации.

### Литература

1. J. Lu, K. Takaichi, T. Uematsu, A. Shirakawa, M. Musha, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani, A.A. Kaminskii, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 41(12A), L1373–L1375 (2002).
2. P. Dorenbos, *Phys. Status Solidi A.*, 202(2), 195–200 (2005).
3. T. Yanagida, Y. Fujimoto, K. Kamada, D. Totsuka, H. Yagi, T. Yanagitani, Y. Futami, S. Yanagida, S. Kurosawa, Y. Yokota, A. Yoshikawa, M. Nikl, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 59(5), 2146–2151 (2012).

## КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЦЕНТРОВ СВЕЧЕНИЯ В АЛМАЗНЫХ ОБРАЗЦАХ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А. А. Крылов, А. Г. Бураченко, Д. А. Переседова,  
В. С. Рипенко, Е. И. Липатов

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г. Томск, [krsas5263@gmail.com](mailto:krsas5263@gmail.com)  
Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, г. Томск*

В данной работе были проведены исследования спектров катодолюминесценции алмазных образцов с различным примесно-дефектным составом в диапазоне температур от 300 до 800 К. Облучение образцов производилось пучком электронов генератора НОРА с отпаянной электронной трубкой ИМА3-150Э [1]. Диапазон энергий электронов пучка составлял 50–300 кэВ. Нагрев образцов осуществлялся с помощью разработанной вакуумной камеры с индукционным нагревательным элементом. Получены зависимости тушения катодолюминесценции различных излучательных центров в образцах алмаза от температуры. Данные зависимости хорошо описываются эмпирическим законом Мотта [2]. Обнаружено, что в данном диапазоне температур для образцов, содержащих NV центры, скорость тушения NV<sup>-</sup> центров ниже, чем скорость тушения NV<sup>0</sup> центров. Известно, что алмаз имеет высокую температурную и радиационную стойкость [3] в отличие от других материалов, применяемых в детекторах заряженных частиц. Поэтому результаты данных исследований найдут применения при проектировании и разработке сцинтилляционных детекторов и детекторов, работающих на основе эффекта Вавилова – Черенкова при высоких температурах.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00984, <https://rscf.ru/project/22-22-00984/>.*

### Литература

1. Г.А. Месяц, отв. ред. Сильноточные импульсные пучки в технологии. Н.: Наука: Сиб. отд-ние, 1983. С. 139–147.
2. А.М. Zaitsev. Optical Properties of Diamond: A Data Handbook. Berlin: Springer, 2001. P. 250.
3. Р.А. Хмельницкий, Н.Х. Галипов, Г.В. Чучева. Синтетический алмаз для электроники и оптики. М.: Издательство ИКАР, 2017. С. 21–32.



## КВАНТОВЫЕ И АТОМИСТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЗАПИСИ В ДИЭЛЕКТРИКАХ

С. И. Кудряшов

*Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Россия, г. Москва  
Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
Россия, г. Екатеринбург, [sikudryashov@urfu.ru](mailto:sikudryashov@urfu.ru)*

Динамическое возбуждение граничных плазмон-поляритонов в плазме микромасштабных филаментов ультракоротких лазерных импульсов дает начало целому классу новых нелинейно-оптических, плазменных и структурных явлений в объемных диэлектрических материалах, в первую очередь – их экспериментально демонстрируемому управляемому нано- и микромасштабному периодическому структурированию в виде брэгговских отражателей, двулучепреломляющих и хиральных структур.

Запись квантовых эмиттеров  $NV^0$  и  $NV^-$ -типа с использованием ультракоротких лазерных импульсов систематически исследована в серии синтетических Ib-и Pa-алмазов на примере элементарных атомистических реакций замещающих атомов азота (C-центров) и фотогенерированных вакансий, сопоставляя выход  $NV^0$  и  $NV^-$ -центров с спектральными характеристиками полосы структурно-чувствительного сигнала комбинационного рассеяния в зависимости от пиковой интенсивности лазерного излучения. Прослежена корреляция внутрицентрового фотовозбуждения C-центров и формирования квантовых эмиттеров  $NV^0$  и  $NV^-$ -типа через механизм взаимодействия электронных возбуждений с оптическими фононами алмаза.

*Исследования поддержаны грантом Российской научного фонда (проект № 21-79-30063), <https://rscf.ru/en/project/21-79-30063/>.*

## ОСЦИЛЛЯЦИЯ ПОПЕРЕЧНОГО РАЗМЕРА СВЕТОВОЙ ПУЛИ

А. В. Кузнецов

*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН,  
Россия, г. Иркутск, [a.v.kuznetsov@bk.ru](mailto:a.v.kuznetsov@bk.ru)*

В данной работе теоретически исследуется осцилляция поперечного размера центральной области фемтосекундной световой пули при её движении в прозрачной среде.

Построенная модель показывает наличие фазовой разности между осцилляциями поперечного размера пули и пиковой напряженности электрического поля в ней.

Результаты теоретических расчетов сопоставляются с известными результатами экспериментов по наведению световыми пулями среднего ИК-диапазона люминесцентных треков в кристалле LiF.

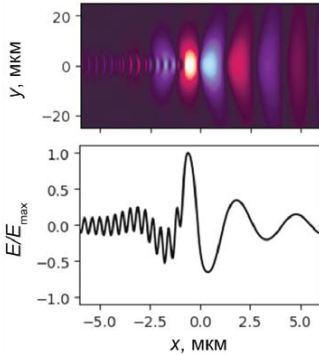


Рис. 1. Распределение относительной напряженности электрического поля световой пули: в продольном сечении (вверху) и на оси (внизу)

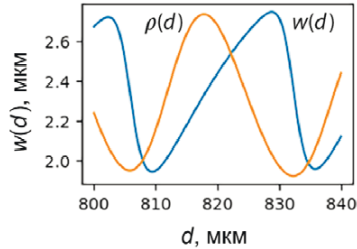


Рис. 2. Осцилляции ширины  $w$  индуцированного плазменного канала и концентрации плазмы  $\rho$  на оси канала  $d$

*Работа поддержана научным проектом 0243-2021-0004 в рамках плана фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 г.*

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТАПОВЕРХНОСТИ В ГИБРИДНОМ АНАПОЛЬНОМ РЕЖИМЕ С КВАЗИ-ССК

А. В. Кузнецов, А. С. Шалин

*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Россия, г. Долгопрудный, alexey.kuznetsov98@gmail.com*

Полностью диэлектрическая нанофотоника открывает новые горизонты в создании различных устройств нового поколения, превосходящих существующие аналоги по эффективности и компактности [1–4]. В частности, большой интерес представляют различные формы нанорассеивателей, благодаря нестандартной геометрии которых становится возможным получение ряда новых эффектов за счет, например нарушения симметрии объекта [5]. На основе таких нанорассеивателей можно создавать метаповерхности для управления светом на наноуровне. Например, использование связанного состояния в континууме (квази-ССК) становится возможным получение высокодобротных резонансов в устройствах [6; 7].

Для описания свойств нанорассеивателей обычно используется мультиполюное разложение. Благодаря этому становится возможным разрабатывать различные эффекты на основе комбинаций мультиполей [8–10], например, гибридный анапольный режим, который можно использовать для управления фазой проходящего через метаповерхность излуче-

ния, сохраняя единичную пропускаемость структуры и не накладывая ограничения на положение метаатомов и материал подложки (рис.) [11–13].

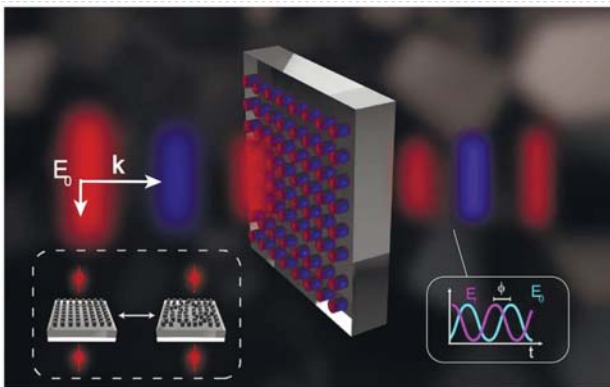


Рис. Схематический обзор метаповерхностей Si, состоящих из наночастиц в гибридном анапольном режиме, иллюстрирующий их новые функциональные возможности: полное пропускание (слева), фазовый контроль (справа) и пренебрежимо малая электромагнитная связь, что позволяет создавать сверхкомпактные, а также неупорядоченные массивы, сохраняющие одночастичный отклик. Структура освещается плоской волной с амплитудой  $E_0$

В данной работе мы демонстрируем возможность получения высокочастотного состояния, называемого квази-ССК (quasi-BIC), на магнитном квадруполье на частоте, совпадающей с недавно открытым гибридным анапольным режимом (квадруполь в режиме квази-ССК, а другие пренебрежимо малы из-за гибридного анапольного режима) на частице кремния в форме усеченного конуса. Используя такие частицы в качестве метаатомов, численно исследованы оптические свойства структуры.

Благодаря уникальному сочетанию нескольких эффектов удастся получить полностью прозрачную метаповерхность, оптические свойства которой существенно меняются при изменении показателя преломления окружающей среды. На основе такой структуры становится возможным создание сверхтонкого чувствительного датчика изменения показателя преломления среды.

*Авторы выражают благодарность Министерству науки и высшего образования Российской Федерации за финансовую поддержку (договор № 075-15-2022-1150). Исследование гибридных анапольных режимов частично поддержано РНФ (грант № 21-12-00151).*

#### Литература

1. H.K. Shamkhi, A. Sayanskiy, A.C. Valero, A.S. Kupriianov, P. Kapitanova, Y.S. Kivshar, A.S. Shalin, V.R. Tuz, *Phys. Rev. Mater.*, 3(8), 085201 (2019).

2. D.V. Novitsky, A. Karabchevsky, A.V. Lavrinenko, A.S. Shalin, A.V. Novitsky, *Phys. Rev. B*, 98(12), 125102 (2018).
3. A.C. Valero, D. Kislov, E.A. Gurvitz, H.K. Shamkhi, A.A. Pavlov, D. Redka, S. Yankin, P. Zemánek, A.S. Shalin, *Adv. Sci.*, 7(11), 1903049 (2020).
4. N.A. Kostina, D.A. Kislov, A.N. Ivinskaya, A. Proskurin, D.N. Redka, A. Novitsky, P. Ginzburg, A.S. Shalin, *ACS Photonics*, 7(2), 425–433 (2020).
5. A.V. Kuznetsov, A.C. Valero, H.K. Shamkhi, P. Terekhov, X. Ni, V. Bobrovs, M.V. Rybin, A.S. Shalin, *Sci. Rep.*, 12, 21904 (2022).
6. M.V. Rybin, K.L. Koshelev, Z.F. Sadrieva, K.B. Samusev, A.A. Bogdanov, M.F. Limonov, Y.S. Kivshar, *Phys. Rev. Lett.*, 119, 243901 (2017).
7. D.V. Novitsky, A.S. Shalin, D. Redka, V. Bobrovs, A.V. Novitsky, *Phys. Rev. B*, 104(8), 085126 (2021).
8. H. Barhom, A.A. Machnev, R.E. Noskov, A. Goncharenko, E.A. Gurvitz, A.S. Timin, V.A. Shkoldin, S.V. Koniakhin, O.Y. Koval, M.V. Zyuzin, A.S. Shalin, I.I. Shishkin, P. Ginzburg, *Nano Lett.*, 19(10), 7062–7071 (2019).
9. P.D. Terekhov, A.B. Evlyukhin, D. Redka, V.S. Volkov, A.S. Shalin, A. Karabchevsky, *Laser Photonics Rev.*, 14(4), 1900331 (2020).
10. P.D. Terekhov, K.V. Baryshnikova, Y. Greenberg, Y.H. Fu, A.B. Evlyukhin, A.S. Shalin, A. Karabchevsky, *Sci. Rep.*, 9, 3438 (2019).
11. A.K. Ospanova, A. Basharin, A.E. Miroshnichenko, B. Luk'yanchuk, *Opt. Mater. Express*, 11(1), 23–34 (2021).
12. A.C. Valero, E.A. Gurvitz, F.A. Benimetskiy, D.A. Pidgayko, A. Samusev, A.B. Evlyukhin, V. Bobrovs, D. Redka, M.I. Tribelsky, M. Rahmani, K.Z. Kamali, A.A. Pavlov, A.E. Miroshnichenko, A.S. Shalin, *Laser Photonics Rev.*, 15(10), 2100114 (2021).
13. A.V. Kuznetsov, A.C. Valero, M. Tarkhov, V. Bobrovs, D. Redka, A.S. Shalin, *Nano-photonics*, 10(17), 4385–4398 (2021).

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗОНАНСНОГО ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ В БИНАРНЫХ СИСТЕМАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ

Д. О. Кузнецова, Е. А. Слюсарева, Н. В. Слюсаренко

*Сибирский федеральный университет,  
Россия, г. Красноярск, [vip.theraven@mail.ru](mailto:vip.theraven@mail.ru)*

Настройка оптических параметров представляет интерес для решения важных задач в приложениях флуоресцентной микроскопии, оптоэлектроники, оптических сенсорах и т. д. Так, одним из механизмов, который реализуется в таких системах, является резонансный перенос энергии (ПЭ). Использование флуорофоров, спектральные параметры которых обратимо реагируют на изменение условий окружения, открывает возможность управления эффективностью переноса энергии. В качестве такого флуорофора возможно использование коллоидных квантовых точек (КТ), спектральные свойства которых обратимо изменяются под действием температуры окружения (положение максимума, интенсивность спектра фотолюминесценции и т. д.) [1].

Для численного расчета были подобраны вододиспергируемые коллоидные квантовые точки CdTe (донор) и органический краситель розо-

вый бенгальский (акцептор) с подходящими спектральными параметрами для возможного наблюдения ПЭ. Теория Фёрстера и численный метод Монте-Карло были использованы для оценки эффективности переноса энергии в системе при различных концентрациях донорно-акцепторной пары, геометрии и температуры окружения в диапазоне 78–468 К.

В результате моделирования выявлена количественная связь параметров резонансного переноса энергии на органический краситель с температурозависимыми спектральными и фотофизическими характеристиками коллоидных квантовых точек CdTe. Обнаружена возможность управления параметрами ПЭ такими как: радиус Фёрстера, эффективность и константа скорости ПЭ. Эффективность ПЭ можно варьировать в пределах 20–90 % путем температурной настройки положения максимума спектра ФЛ и квантового выхода КТ.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант МК-995.2022.1.2).*

#### Литература

1. Н.В. Слюсаренко, М.А. Герасимова, В.В. Слабко, Е.А. Слюсарева, *Изв. вузов. Физика*, 60, 88–94 (2017).

## ПОЛУЧЕНИЕ ОБРАТИМОЙ ЗАПИСИ В СТЕКЛЕ, СОДЕРЖАЩЕМ ПРЕКУРСОРЫ ПЕРОВСКИТА, ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Н. К. Кузьменко, Л. С. Логунов, Е. В. Колобкова,  
Н. В. Никоноров, С. В. Макаров

*Национальный исследовательский университет ИТМО,  
Россия, г. Санкт-Петербург, [nataliakuz01@yandex.ru](mailto:nataliakuz01@yandex.ru)*

За последние десять лет материалы, содержащие перовскиты CsPbX<sub>3</sub> (X=C1, Br, I), набрали большую популярность в качестве объекта исследования. В этом ряду особо выделяются нанокристаллы (НК) CsPbBr<sub>3</sub> благодаря их уникальным оптоэлектронным свойствам. Было показано, что CsPbBr<sub>3</sub> могут быть получены в объеме стеклянной матрицы в процессе взаимодействия стекла с фемтосекундным (ФС) лазерным излучением, что впервые было продемонстрировано в [1]. Оказалось, что люминесценция НК может быть контролируемо погашена и восстановлена [2], что открывает возможность использования стекла с перовскитами для объемной обратимой оптической записи.

В ходе работы было исследовано взаимодействие ФС лазерного излучения с фторфосфатной стеклянной матрицей, содержащей ионы Pb<sup>2+</sup>, Br<sup>+</sup>, Cs<sup>+</sup>. Фокусировка излучения производилась под поверхностью образца на глубине около 200 мкм. После облучения лазером стекло подвергался

лось термообработке при температуре ниже температуры стеклования. В результате в объеме стекла были получены люминесцирующие паттерны из НК CsPbBr<sub>3</sub>. Было продемонстрировано влияние параметров лазерного излучения на характеристики паттернов, а также получена обратимая объемная запись. Исследование показало, что в выбранной матрице рост НК происходит при плотностях мощности лазера на порядок меньших по сравнению с необходимыми для роста НК в боросиликатных и борогерманатных стеклах [1; 2]. Также в ходе работы была сформулирована гипотеза о механизмах роста НК CsPbBr<sub>3</sub> при ФС воздействии и изменении их люминесцентных свойств.

### Литература

1. X. Huang, Q. Guo, D. Yang, X. Xiao, X. Liu, Z. Xia, F. Fan, J. Qiu, G. Dong, *Nat. Photonics*, 14, 82–88 (2019).
2. X. Huang, Q. Guo, S. Kang, T. Ouyang, Q. Chen, X. Liu, Z. Xia, Q. Zhang, J. Qiu, G. Dong, *ACS Nano*, 14(3), 3150–3158 (2020).

## ОПТИЧЕСКИЕ АЗОТНЫЕ ЦЕНТРЫ В ПРИРОДНЫХ РОЗОВЫХ АЛМАЗАХ

Е. В. Кузьмин, Е. Н. Римская, П. А. Данилов, С. И. Кудряшов

*Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН,  
Россия, г. Москва, [e.kuzmin@lebedev.ru](mailto:e.kuzmin@lebedev.ru)*

При лазерном облучении природных алмазов дефекты, присутствующие во внутренней структуре кристаллов, оказывают значительное влияние на результат воздействия [1]. Одним из наиболее протяжённых дефектов являются пластические деформации, проходящие через весь кристалл и значительно перераспределяющие оптические центры.

В данной работе проводится исследование природного розового алмаза IaAB типа с помощью двухволновой трёхмерной микроспектроскопии комбинационного рассеяния света. Изучены типы и концентрации оптических азотных центров, как на поверхности, так и в объёме кристалла. Показано, что комбинации азотных дефектов, определяющих свойства алмаза чувствительны к напряжениям кристаллической решётки, и концентрируются в зонах пластической деформации [2].

*Авторы признательны Российскому научному фонду за финансовую поддержку данных исследований в рамках проекта № 21-79-30063.*

### Литература

1. P.A. Danilov, E.V. Kuzmin, E.N. Rimskaya, J. Chen, R.A. Khmel'nitskii, A.N. Kirichenko, N.B. Rodionov, S.I. Kudryashov, *Micromachines*, 13(11), 1883 (2022).
2. S.I. Kudryashov, E.N. Rimskaya, E.V. Kuzmin, G.Y. Kriulina, V.I. Pryakhina, A.V. Muratov, R.A. Khmel'nitskii, E.D. Greshnyakov, P.A. Danilov, V.Y. Shur, *Chemosensors*, 11(1), 24 (2023).

## ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА $\text{LuAl}_3(\text{BO}_3)_4:\text{Dy,Tm}$ И $\text{LaMgB}_5\text{O}_{10}:\text{Tb,Eu}$

Н. Н. Кузьмин<sup>1,2,3</sup>, К. Н. Болдырев<sup>1,3</sup>, В. В. Мальцев<sup>2</sup>, Д. Д. Митина<sup>2</sup>,  
Д. В. Дейнеко<sup>2</sup>, Е. А. Волкова<sup>2</sup>, Е. В. Копорулина<sup>2,4</sup>, А. И. Жилиева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт спектроскопии РАН, Россия, г. Троицк, [nik.nik.kuzmin@yandex.ru](mailto:nik.nik.kuzmin@yandex.ru)

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Россия, г. Москва

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Россия, г. Долгопрудный

<sup>4</sup>Институт проблем комплексного освоения недр им. академика  
Н. В. Мельникова РАН, Россия, г. Москва

В силу большого разнообразия структур кристаллические материалы на основе безводных боратов являются потенциальными носителями востребованных функциональных свойств [1]. Они используются в качестве активных сред лазеров и нелинейных оптических материалов, некоторые их представители являются высокоэффективными люминофорами, мультиферроиками.

В данной работе синтезированы твердые растворы  $\text{La}_{1-x-y}\text{Tb}_x\text{Eu}_y\text{MgB}_5\text{O}_{10}$  и  $\text{Lu}_{1-x-y}\text{Dy}_x\text{Tm}_y\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$ . Проведено исследование спектров люминесценции  $\text{LuAl}_3(\text{BO}_3)_4:\text{Dy,Tm}$  и  $\text{LaMgB}_5\text{O}_{10}:\text{Tb,Eu}$ . Установлено, что в  $\text{La}_{1-x}\text{Tb}_x\text{MgB}_5\text{O}_{10}$  интенсивность свечения ионов  $\text{Tb}^{3+}$  максимальна при  $x = 0,4-0,5$ , в  $\text{La}_{1-x}\text{Eu}_x\text{MgB}_5\text{O}_{10}$  интенсивность свечения ионов  $\text{Eu}^{3+}$  максимальна при  $x = 0,3-0,4$ , а в  $\text{Lu}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$  интенсивность свечения ионов  $\text{Dy}^{3+}$  максимальна при  $x = 0,02$  при возбуждении излучением с длиной волны 365 нм.

Полученные результаты, а также высокая интенсивность свечения, химическая стойкость, высокая теплопроводность данных боратов позволяют сделать вывод о перспективности применения этих соединений, легированных редкоземельными ионами, в качестве эффективных люминофоров для светодиодов с УФ излучателями, а также для целей люминесцентной термометрии.

*Работа выполнена при поддержке проекта РНФ (№ 19-72-10132-П). Н. Н. Кузьмин и К. Н. Болдырев входят в состав ведущей научной школы РФ «Опτικο-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (проект НШ-776.2022.1.2).*

### Литература

1. M. Mutailipu, K.R. Poeppelmeier, S. Pan, *Chem. Rev.*, 121(3), 1130–1202 (2021).

## ВЛИЯНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ПРИМЕСЕЙ НА СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ $ZnWO_4$

К. В. Кулешова<sup>1,2</sup>, К. А. Субботин<sup>1,2</sup>, А. И. Титов<sup>1,2</sup>, В. А. Соломатина<sup>2</sup>,  
А. В. Хомяков<sup>2</sup>, Е. Р. Пакина<sup>2</sup>, В. А. Яковлев<sup>3</sup>, Д. Т. Валяев<sup>3</sup>,  
М. П. Зыкова<sup>2</sup>, Я. С. Диденко<sup>1,2</sup>, Д. А. Лис<sup>1</sup>, М. Б. Гречишин<sup>2</sup>,  
С. Х. Батыгов<sup>1</sup>, И. Х. Аветисов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН,  
Россия, г. Москва, [kristinka-0601@mail.ru](mailto:kristinka-0601@mail.ru)*

<sup>2</sup>*Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,  
Россия, г. Москва*

<sup>3</sup>*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск*

Кристалл  $ZnWO_4$  является перспективным сцинтиллятором, ВКР- и лазерным кристаллом. При этом наличие в данном кристалле примеси железа даже в следовых количествах (индикатором чего является бежевая окраска) дает заметное падение сцинтилляционных характеристик. Поэтому технология получения кристаллов  $ZnWO_4$ , свободных от ионов железа, является актуальной задачей. В рамках работы была разработана простая технология глубокой очистки реактивов  $ZnO$  и  $WO_3$ , из которых методом Чохральского был получен визуально бесцветный («чистый») кристалл  $ZnWO_4$ . Также из коммерчески доступных реактивов  $ZnO$  и  $WO_3$  чистой «5N» был выращен кристалл-эталон  $ZnWO_4$  бежевого цвета.

Проведен комплекс сравнительных спектроскопических исследований кристаллов  $ZnWO_4$ , включающий спектры оптического поглощения, рентгенолюминесценции, возбуждения фотолюминесценции, а также спектры и кинетики затухания фото-, и катодолюминесценции.

Спектры фото- рентгено- и катодолюминесценции кристаллов почти идентичны по форме, спектральному диапазону и положению максимумов. При этом интенсивность люминесценции «чистого» кристалла значительно больше, чем у кристалла-эталоны, диапазон свечения и положение максимума для «чистого» кристалла слегка смещены в синюю сторону по сравнению с таковыми для кристалла-эталоны из-за небольшого перепоглощения люминесценции в кристалле-эталоны.

Кинетика затухания фотолюминесценции для обоих кристаллов моноэкспоненциальна с одинаковым временем жизни, что указывает на отсутствие каких-либо механизмов безызлучательного взаимодействия между центрами люминесценции и случайными примесными ионами в кристаллах. Кинетика затухания катодолюминесценции представляет собой суперпозицию экспоненты и гиперболы, что говорит о заметном вкладе рекомбинационной люминесценции. Спектры возбуждения кристаллов демонстрируют существенные отличия.

*Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 23-22-00416).*



## СПУТНИКОВАЯ КВАНТОВАЯ КРИПТОГРАФИЯ

В. Л. Курочкин

*Центр компетенций НТИ «Квантовые коммуникации»,  
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
Россия, г. Москва, [v.kurochkinl@rsc.ru](mailto:v.kurochkinl@rsc.ru)  
ООО «Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий»  
(Российский квантовый центр), Россия, г. Москва*

Оптические потери в вакууме для организации лазерной связи на дальние расстояния между произвольными точками на земной поверхности меньше, чем при применении оптоволоконных линий. Поэтому такие линии являются наиболее многообещающими для создания крупномасштабных сетей передачи данных. Дальность связи ограничена кривизной поверхности Земли. Поэтому однофотонные системы распределения квантового ключа рассматриваются как перспективные для создания глобальных квантовых спутниковых сетей. Первый спутник с системой распределения квантового ключа [1; 2] успешно продемонстрировал эти преимущества. В докладе представлены материалы по развитию инфраструктуры приемных квантовых станций по территории России для организации спутниковых квантовых сетей [3] на базе двух астрономических обсерваторий и даны первые экспериментальные результаты по регистрации спутникового квантового ключа [4].

*Работа выполнена при финансовой поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Стратегический проект «Квантовый интернет»).*

### Литература

1. S.K. Liao, W.Q. Cai, W.Y. Liu et al., *Nature*, 549(7670), 43–47 (2017).
2. S.K. Liao, W.Q. Cai, J. Handsteiner et al., *Phys. Rev. Lett.*, 120, 030501 (2018).
3. A.V. Khmelev, E.I. Ivchenko, A.V. Miller, A.V. Duplinsky, V.L. Kurochkin, Y.V. Kurochkin, *Entropy*, 25(4), 670 (2023).
4. A. Khmelev, A. Duplinsky, R. Bakhshaliev et al., Abstracts of VII International Conference on Quantum Technologies ICQT-2023 (Moscow, 2023). (в печати)

## ЭКСИТОННЫЕ СВОЙСТВА ХИРАЛЬНЫХ АТОМАРНО-ТОНКИХ НАНОСТРУКТУР CdSe

Д. А. Куртина, Р. Б. Васильев

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,  
Россия, г. Москва, [kurtinadaria@gmail.com](mailto:kurtinadaria@gmail.com)*

Понимание того, как взаимодействие анизотропии, электронной и кристаллической структуры и координации лигандов в 2D наноструктурах приводит к сильной оптической активности и высокому сигналу кругового дихроизма, остается не решенной задачей.

В настоящей работе было проведено исследование индукции хиральности (создание оптической активности наночастиц, индуцируемой хиральными лигандами) в атомарно-тонких коллоидных наноструктурах на основе CdSe при обмене нативных длинноцепочечных лигандов на хиральные лиганды L-цистеина (L-Cys) и N-ацетил-L-цистеина (L-AcCys). Были получены двумерные наноструктуры состава  $[Cd_{(n+1)}Se_{(n)}L_{(2)}]$ , L – органический лиганд X-типа, n – число монослоев, с предельно тонкими толщинами 0,6 и 0,9 нм (2,5 и 3,5 монослоя) и латеральными размерами 100–200 нм, чтобы достичь чистого 2D-режима квантового конфайнмента для экситонов и усилить их взаимодействие с хиральными лигандами на базальных плоскостях наночастиц.

Оптические и хироптические свойства хиральных атомарно-тонких нанопластин CdSe были изучены с помощью спектроскопии поглощения, люминесценции и кругового дихроизма (CD). Исследовано поведение хиральных экситонов в зависимости от типа лиганда и толщины наноструктуры. Установлены разные знаки кругового дихроизма для лигандов L-цистеина и N-ацетил-L-цистеина, что подтверждается разной координацией этих лигандов. Максимальное значение фактора диссимметрии  $(2-3) \times 10^{-3}$  было обнаружено для N-ацетил-L-цистеина для предельно тонких наноструктур. Детальные исследования экситонных свойств были дополнены анализом влияния типа растворителя. Была показана зависимость спектрального положения и интенсивности экситонных полос от диэлектрической проницаемости среды, что свидетельствует о вкладе экситонов Ванье-Мотта в свойства таких систем. Анализ люминесцентных свойств хиральных наноструктур показал неожиданный эффект расщепления экситонных полос при комнатной температуре.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-13-0 0101.*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЗАПИСИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУСЛОЙНОЙ ПЛЕНКИ a-Si/Cr

Р. И. Куц, Д. А. Белоусов, В. П. Корольков

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН,  
Россия, г. Новосибирск, [r.i.kuts@mail.ru](mailto:r.i.kuts@mail.ru)*

Технология прямой лазерной записи на тонких металлических пленках широко применяется для создания дифракционных оптических элементов (ДОЭ) и компьютерно-синтезированных голограмм (КСГ) [1; 2], формирующих заданный волновой фронт. Существует ряд задач, в которых необходимо использовать широкоапертурные КСГ, например, для контроля формы асферических поверхностей. Для таких КСГ при увеличении апертуры характерно уменьшение периода дифракционной структуры. В настоящее время, одной из важнейших задач развития технологии прямой лазерной записи, применительно к производству КСГ, является повышение пространственного разрешения термохимической лазерной технологии.

В данной работе исследуются возможности повышения пространственного разрешения технологии прямой термохимической лазерной записи на широко применяемых для производства ДОЭ пленках хрома. При экспонировании остро сфокусированным лазерным пучком пленки хрома существует энергетический порог активации процесса окисления. Это позволяет формировать структуры, которые записываются той областью гауссова пятна, энергия которой превышает порог термохимического процесса. Таким образом, создаются структуры меньшие по размеру, чем само гауссово пятно лазерного записывающего пучка [3].

Чем энергетический порог более резкий, тем слабее влияние на термохимический процесс записи окружающей области пятна, энергия которой меньше пороговой. В данной работе была разработана новая технология прямой лазерной записи на двуслойной пленке a-Si/Cr. Пленка хрома в экспериментах имела толщину порядка 25 нм, а покровная пленка кремния ~ 10 нм. При этом покровный слой кремния служит, во-первых, антиотражающим покрытием на длине волны записывающего лазера, что повышает поглощение двуслойной пленки и, во-вторых, дополнительным материалом для процесса термохимии. При облучении такой пленки её нагрев приводит к образованию на границе хром-кремний тонкого слоя силицида хрома, а на верхней границе плёнки кремния возможно при высоких температурах образование оксида кремния. Также на границе хром-кремний возможно образование оксида и нитрида хрома. Этот модифицированный слой служит эффективной маской при проявлении записанных на хrome структур. Экспериментальные результаты разработки термохимической лазерной технологии записи на двуслойной плёнке a-Si/Cr по-

казали возможность изготовления пропускающего фотошаблона за счет удаления неэкспонированного поверхностного слоя  $\alpha$ -Si в первом селективном травителе и последующего травливания слоя хрома под ним во втором селективном травителе. Участки пленки хрома, покрытые силицидной маской, в течение этих операций остаются нетронутыми, что является существенным преимуществом по сравнению со стандартной хромовой технологией термохимической лазерной записи.

Показано, что такая двуслойная пленка  $\alpha$ -Si/Cr имеет более резкую функцию интенсивности процесса термохимии по сравнению с плёнкой чистого Cr в зависимости от мощности записи, что дает возможность использовать ее для высокоразрешающей лазерной записи ДОО.

*Работа выполнена за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-00049). В исследованиях использовано оборудование Центра коллективного пользования «Спектроскопия и оптика» Института автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук.*

#### Литература

1. S.M. Metev, S.G. Savchenko, K.V. Stamenov, V.P. Veiko, G.N. Kotov, G. Shandibina, *IEEE J. Quantum Electron.*, 17, 2004–2007 (1981).
2. Q.Z. Zhao, J.R. Qiu, X.W. Jiang, E.W. Dai, C.H. Zhou, C.S. Zhu, *Opt. Express*, 13(6), 2089–2092 (2005).
3. A.G. Poleshchuk, V.P. Korolov, *Proc. SPIE*, 6732, 67320X (2007).

## ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ПЛАНКТОНА ОЗЕРА БАЙКАЛ

Н. Л. Лазарева<sup>1,2</sup>, В. П. Дресвянский<sup>1,2</sup>, С. В. Кобелева<sup>2</sup>,  
А. М. Беякова<sup>2</sup>, В. Е. Степаненков<sup>2</sup>, А. Л. Ракевич<sup>1</sup>, О. Т. Русинек<sup>2,3</sup>,  
А. Б. Купчинский<sup>3</sup>, Е. Ф. Мартынович<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН,  
Россия, г. Иркутск, [alberet94@mail.ru](mailto:alberet94@mail.ru)

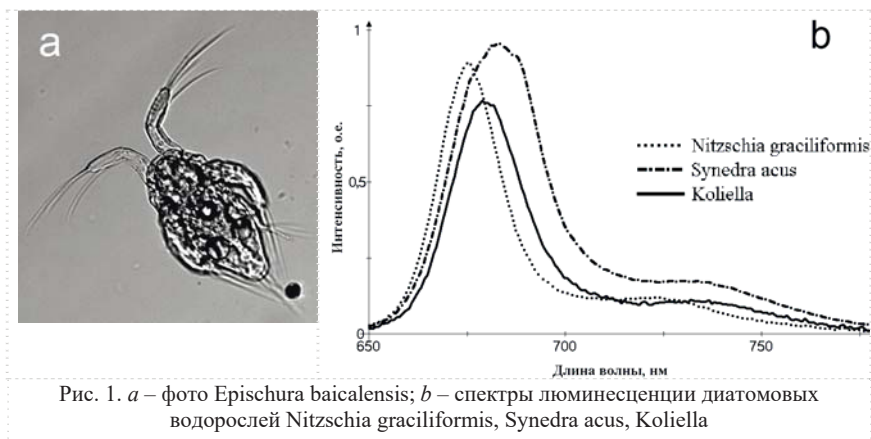
<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, Россия, г. Иркутск

<sup>3</sup>Байкальский музей СО РАН, Россия, пос. Листвянка

*Epischura baicalensis* принадлежит доминирующая роль в планктоне пелагиали оз. Байкал. В течение большей части года *Epischura baicalensis* составляет до 90 % общей биомассы зоопланктона оз. Байкал. Объектом питания *Epischura baicalensis* являются байкальские водоросли (фитопланктон). Необходимо заметить, что фитопланктон вод мирового океана люминесцентными методами изучается достаточно широко [1–2]. В связи с этим значительный научный интерес представляет применение люминесцентных методик для исследования *Epischura baicalensis*, как основного потребителя байкальского фитопланктона и важнейшего организма экосистемы Байкала. Исследование малых форм планктона, обитающего в

оз. Байкал, является актуальным направлением, так как они являются продуктами питания *Epischura baicalensis* – основного потребителя байкальского фитопланктона и важнейшего организма экосистемы озера, являющегося пищей для других ракообразных и пелагических рыб: байкальский омуль, голомянка, желтокрылка и др. [4–6]

В рамках данной работы были исследованы и соотнесены люминесцентные характеристики фито- и зоопланктона Байкала. Исследования спектрально-кинетических характеристик планктона проводились на лазерном конфокальном сканирующем люминесцентном микроскопе с временным разрешением MicroTime 200. Пространственное разрешение микроскопа позволяет производить измерения на объекте исследования с точностью до дифракционного предела, сопоставимого с длиной волны оптического излучения. Регистрация спектров фотолюминесценции выполнялась спектрометром Ocean Optics QE65000, совмещенным с микроскопом MicroTime 200. Люминесценция возбуждалась пикосекундными лазерами с длиной волны излучения 375 и 405 нм. Для подавления возбуждающего излучения использовались Г-образные светофильтры с длиной волны отсечки 400 и 430 нм соответственно.



Результаты лазерной конфокальной сканирующей люминесцентной микроскопии с временным разрешением показали, что основной вклад в спектры люминесценции *Epischura baicalensis* вносит свечение *Green Fluorescent Protein* (GFP) и хлорофилла – составная часть фитопланктона. Известно, что интенсивность полос люминесценции фитопланктона зависит от концентрации хлорофилла и может служить экологическим маркером водоема [1].

*Работа выполнена в рамках плана фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 года (№ проекта 0243-2021-0004).*

## Литература

1. Alexander Yu. Popik, Evgeniy L. Gamayunov. *Pac. Science Rev. A: Natural Science and Engineering*, 17, pp. 29-33 (2015).
2. S.S. Voznesenskii, E.L. Gamayunov, A. Yu Popik, A.A. Korotenko. *Instrum. Exp. Tech.*, 57 (3), pp. 330-335, (2014).
3. Э.Л. Афанасьева, Биология байкальской эпишуры. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 144 с., (1977)
4. О.Т. Rusinek, М.Р. Bakina, A.V. Nikolskii, Natural infection of the calanoid crustacean *Epischura baicalensis* by procercoids of *Proteocephalus* sp. in Listvenichnyi Bay, Lake Baikal. *Journal of Helminthology*, 70, 237-247, (1996)
5. A.A. Alekseev, V.P. Dresvyanskiy, A.L. Rakevich, O.T. Rusinek, E.F. Martynovich, Luminescence of body tissues of *Epischura baicalensis*, AIP Conference Proceedings 2392, (2021)

## НАРУШЕНИЕ ПРИНЦИПА ВЗАИМНОСТИ В МЕТАМАТЕРИАЛАХ С ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ ДЛЯ ЗАДАЧ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

В. М. Левковская, А. В. Харитонов, С. С. Харинцев

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики,  
Россия, г. Казань, [levkovskaya.valeriya@gmail.com](mailto:levkovskaya.valeriya@gmail.com)*

Одним из ключевых элементов в технологиях сверхплотной передачи информации и беспроводной передачи энергии являются оптические циркуляторы и изоляторы. Реализация данных устройств требует нарушения принципа взаимности Лоренца. Наиболее распространенный способ создания невзаимной системы основан на использовании магнитооптических эффектов. Однако для этого требуются сильные внешние магнитные поля или протяженные среды, либо экзотические материалы с большой магнитной восприимчивостью. Данный фактор существенно ограничивает миниатюризацию невзаимных оптических устройств и их полномасштабное внедрение.

Настоящая работа посвящена разработке метода нарушения взаимности в немагнитных средах с планарной геометрией. Для этих целей исследуются оптические эффекты в средах с временной и пространственно-временной модуляцией оптических параметров. В последнее время данный класс искусственных материалов привлек большой теоретический и практический интерес. Системы, где одним из компонентов выступает материал с переменным во времени показателем преломления, могут стать альтернативным способом нарушить принцип взаимности. Существуют несколько методов, с помощью которых можно переключать показатель преломления среды во времени. Один из таких методов основан на оптическом эффекте Керра, где модуляция среды создается путем использования импульсных лазеров с высокой интенсивностью излучения.

В работе рассчитаны коэффициенты отражения и пропускания света при его прохождении через среду с пространственно-временной неоднородностью. Исследовано влияние таких параметров, как профиль и скорость пространственно-временного переключения показателя преломления. Изучены эффекты нарушения закона Снеллиуса. Построена модель невзаимного излучателя и проведен численный расчет методом конечных элементов. В результате моделирования были определены оптимальные параметры пространственно-временной неоднородности материала, при которых нарушается принцип взаимности.

## СИСТЕМЫ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В АЛМАЗЕ НА 489 нм

С. В. Лепеха<sup>1</sup>, Е. А. Васильев<sup>2</sup>, Д. А. Зедгенизов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого УрО РАН,  
Россия, г. Екатеринбург, [Lepkha@igg.urun.ru](mailto:Lepkha@igg.urun.ru)*

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский горный университет, Россия, г. Санкт-Петербург*

В спектрах поглощения и фотолюминесценции (ФЛ) алмаза отражается большое количество дефектов кристаллической структуры (ДКС) [4], линии которых могут перекрываться, затрудняя идентификацию и изучение ДКС. Оптический центр с бесфононной линией (БФЛ) 489 нм (2,535 эВ) зачастую определяется как S2 система, включающая также БФЛ 479 нм (2,596 эВ) и 523 нм (2,596 эВ), последняя линия может регистрироваться индивидуально. Однако в природных алмазах встречается центр с БФЛ при 489 нм, который в отличие от S2 не имеет интенсивной зелёной ФЛ, и не соответствует по параметрам радиационно-индуцированным ДКС.

Для выявления особенностей систем ФЛ с линией 489 нм проведено изучение и сравнение спектров эмиссии и возбуждения ФЛ кристаллов природного и синтетического НРНТ алмаза. Спектры эмиссии синтетического алмаза соответствуют системам S2 и S3 по литературным данным [2; 3], в то время как спектры возбуждения демонстрируют разность их энергетической структуры в результате вклада S2 системы в ФЛ на 496 нм.

В природном кристалле система 489 нм имеет контур, типичный для ФЛ азотно-вакансионных центров. Спектры возбуждения и эмиссии зеркальны, что подтверждает внутрицентровую природу системы. Наиболее интенсивное фононное повторение в спектре эмиссии и возбуждения соответствует энергии 0,073 эВ. В докладе также будут представлены результаты изучения кинетики затухания системы 489 нм, и анализа электронно-колебательного спектра.

Таким образом, в алмазе существует несколько ДКС с положением БФЛ 489 нм, а перечень выявленных и изученных систем, в том числе азотно-вакансионных, пока не полон.

*Работа выполнена в рамках темы № 123011800012-9 государственного задания ИГГ УрО РАН.*

#### **Литература**

1. Ю.А. Клюев, Ю.А. Дуденков, В.И. Непша, *Геохимия*, № 7, 1029–1036 (1973).
2. I.N. Kupriyanov, V.A. Gusev, Yu.M. Borzdov, A.A. Kalinin, Yu.N. Pal'yanov, *Diam. Relat. Mater.*, 8, 1301–1309 (1999).
3. A. Yelissejev, H. Kanda, *New diam. front. carbon technol.*, 17(3), 127–178 (2007).
4. A.M. Zaitsev. *Optical Properties of Diamond: A Data Handbook*. Berlin: Springer, 2001. 502 p.

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА В ЭЛЕКТРОНИКЕ И ФОТОНИКЕ**

Е. И. Липатов<sup>1,2</sup>, А. С. Попова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г. Томск*

<sup>2</sup>*Институт си́нхротронной электроники СО РАН,  
Россия, г. Томск, [evl@mail2000.ru](mailto:evl@mail2000.ru)*

На основе алмаза разрабатываются, создаются и применяются теплоотводы для приборов сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона, высоковольтных ключей для задач си́нхротронной электроники, СВЧ-транзисторы, ультрафиолетовые фотодиоды, датчики и детекторы высокоэнергетических частиц и рентгеновского излучения, выходные окна гиротронов, лазеры на центрах окраски, лазеры на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния, выходные окна лазеров инфракрасного диапазона, квантовые сенсоры магнитного поля, температуры, акселерометры, гироскопы, а также квантовые ускорители и процессоры.

Дальнейшее развитие недавно созданных лазеров на центрах окраски в алмазе [1; 2] приведёт к разработке и созданию фотонных интегральных схем, способных работать в условиях высоких температур и радиационного воздействия, факторов космического пространства и вблизи ядерных реакторов. Гибридные устройства на основе интерфейсов алмаза и графена предполагают дополнительные возможности в создании быстродействующих электронных и оптоэлектронных устройств на основе кристаллического углерода. Развитие газохимического синтеза монокристаллических алмазных пластин диаметром 55 мм на иридиевых подложках [3] создаёт предпосылки для широкого внедрения алмаза в электронику и фотонику.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0048.*

#### **Литература**

1. А.Г. Бураченко, А.Е. Дормидонов, В.Г. Винс, Д.Е. Генин, А.П. Елисеев, Е.И. Липатов, С.А. Потанин, В.С. Рипенко, А.Д. Саввин, Е.Н. Тельминов, М.А. Шулепов. Фотовоз-



- буждаемый алмазный NV-лазер. Патент РФ № 2779410, кл. H01S3/0602, H01S3/0621, H01S3/0625, H01S3/1601. 2021.
2. A. Savvin, A. Dormidov, E. Smetanina, V. Mitrokhin, E. Lipatov, D. Genin, S. Potanin, A. Yelissejev, V. Vins, *Nat. Commun.*, 12, 7118 (2021).
  3. S.-W. Kim, K. Koyama, *Compound semiconductor*, 29(1), 52–57 (2023).

## МЕДЛЕННОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ АНСАМБЛЯ КВАНТОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ

Н. А. Лозинг<sup>1,2</sup>, Е. А. Смирнова<sup>1,2,3</sup>, М. Г. Гладуш<sup>1,2,4</sup>

<sup>1</sup>Троицкое обособленное подразделение Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, Россия, г. Троицк, [natalialozing@gmail.com](mailto:natalialozing@gmail.com)

<sup>2</sup>Московский педагогический государственный университет, Россия, г. Москва

<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Россия, г. Москва

<sup>4</sup>Институт спектроскопии РАН, Россия, г. Троицк

Обсуждается возможность спонтанного переключения между различными режимами флуоресценции, создаваемыми коллективным ансамблем излучателей в диэлектрической матрице. Предлагается теоретическое описание, основанное на возможности кооперативного ансамбля излучающих центров проявлять внутреннюю кооперативную оптическую мультистабильность. Картины переключения интенсивности соответствуют наблюдаемым в эксперименте [1] спонтанным переходам между одним «тусклым» и несколькими «яркими» режимами флуоресценции ансамбля центров окраски в микрокристалле алмаза, облучаемом непрерывным лазерным излучением. Переходы характеризуются ярко выраженной динамикой роста и снижения интенсивности флуоресцентного сигнала на секундной шкале времени. Показано, что уравнения типа Максвелла – Блоха, описывающие такую систему, при значительной неоднородности ансамбля и больших значениях скорости фазовой релаксации сохраняют возможность наличия нескольких устойчивых стационарных решений, формирующих мультистабильный оптический отклик при определенных сочетаниях мощности накачки и концентрации излучателей. Приведены численный анализ переходных режимов и несколько моделей медленного затухания яркой моды люминесценции. Обсуждаются альтернативные причины такого поведения.

Авторы доклада являются членами ведущей научной школы РФ «Оптико-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (проект НШ-776.2022.1.2). Работа выполнена в рамках темы Государственного задания МПГУ «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нанотехнологиях и фотонике» при поддержке Министерства просвещения РФ (AAAA-A20-120061890084-9)

*совместно с Центром коллективного пользования «Структурная диагностика материалов» Федерального исследовательского центра РАН «Кристаллография и фотоника».*

### **Литература**

1. N.A. Lozing, M.G. Gladush, I.Yu. Eremchev, E.A. Ekimov, A.V. Naumov, *Phys. Rev. B*, 102(6), 060301(R) (2020).

## **ГЕНЕРАЦИЯ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИОНАХ МОЛЕКУЛЯРНОГО АЗОТА В ВОЗДУШНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ**

**В. Ф. Лосев, И. А. Зятиков**

*Институт сильноточной электроники СО РАН,  
Россия, г. Томск, [losev@ogl.hcei.tsc.ru](mailto:losev@ogl.hcei.tsc.ru)*

Генерация когерентного излучения в лазерной плазме на первой отрицательной системе иона молекулярного азота (переход  $B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$ , длина волны 391,4 и 427,8 нм) была впервые получена в 2011 г. [1]. Для накачки использовался короткий и интенсивный инфракрасный лазерный импульс на длинах волн (1,2–2,9) мкм. Для возникновения генерации использовалось дополнительное (затравочное) излучение на третьей или пятой гармониках накачки, длина волны которого совпадала с соответствующим переходом иона молекулярного азота. Генерация была реализована без резонатора на бегущей волне вперед. В дальнейшем генерация была получена и на других длинах волн накачки (800 и 950 нм) как в присутствии внешнего затравочного излучения [2; 3], так и без него [4; 5]. Считается, что для случая без внешнего импульса излучения в качестве его выступает излучение суперконтинуума, возникающего в лазерной плазме одновременно с излучением ионов молекулярного азота. Характерные времена длительности импульса генерации находятся в пикосекундном диапазоне (1,1–7,8 пс) [3; 6–9].

Самое интересное для этой генерации заключается в том, что уже спустя более 10 лет не установлен механизм создания инверсной населенности на ионах молекулярного азота (предлагается 3–4 возможные модели) и остается непонятным механизм получения пикосекундной длительности импульса генерации при усилении в активной среде фемтосекундного импульса.

В настоящей презентации будут обсуждаться механизмы создания инверсной населенности на ионах молекулярного азота, и предлагаться механизм получения пикосекундной длительности импульса генерации.

*Работа была поддержана грантом РФФ № 23-22-00023.*

## Литература

1. J. Yao, B. Zeng, H. Xu, G. Li, W. Chu, J. Ni, H. Zhang, S.L. Chin, Y. Cheng, Z. Xu, *Phys. Rev. A*, 84(5), 051802 (2011).
2. J. Ni, W. Chu, C. Jing, H. Zhang, B. Zeng, J. Yao, G. Li, H. Xie, C. Zhang, H. Xu, S.L. Chin, Y. Cheng, Z. Xu, *Opt. Express*, 21(7), 8746–8752 (2013).
3. J. Yao, G. Li, C. Jing, B. Zeng, W. Chu, J. Ni, H. Zhang, H. Xie, C. Zhang, H. Li, H. Xu, S.L. Chin, Y. Cheng, Z. Xu, *New J. Phys.*, 15(2), 023046 (2013).
4. Y. Liu, Y. Brelet, G. Point, A. Houard, A. Mysyrowicz, *Opt. Express*, 21(19), 22791–22798 (2013).
5. T.J. Wang, J. Ju, J.F. Daigle, S. Yuan, R. Li, S.L. Chin, *Laser Phys. Lett.*, 10(12), 125401 (2013).
6. I.A. Zyatikov, V.F. Losev, D.M. Lubenko, E.A. Sandabkin, *Opt. Lett.*, 45(23), 6518–6521 (2020).
7. A. Azarm, P. Corkum, P. Polynkin, “Rotational Mechanism of Lasing in Singly Ionized Nitrogen Molecules under Femtosecond mid-IR Pumping,” in *Conference on Lasers and Electro-Optics: Applications and Technology (CLEO: A&T) 2016*, OSA Technical Digest (Optica Publishing Group, 2016), JTh4B.9.
8. Y. Liu, P. Ding, G. Lambert, A. Houard, V. Tikhonchuk, A. Mysyrowicz, *Phys. Rev. Lett.*, 115, 133203 (2015).
9. S.L. Chin, H. Xu, Y. Cheng, Z. Xu, K. Yamanouchi, *Chin. Opt. Lett.*, 11, 013201 (2013).

## УШИРЕНИЕ СПЕКТРА ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА ПРИ ЕГО РАСПРОСТРАНЕНИИ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

Д. М. Лубенко, В. Е. Прокопьев

*Институт сильноточной электроники СО РАН,  
Россия, г. Томск, [lubenkodm@gmail.com](mailto:lubenkodm@gmail.com)*

На основе анализа как классических работ [1], так и современных [2; 3], а также экспериментальных данных, проводится современный анализ причин уширения спектра фемтосекундного лазерного импульса при распространении в газовых средах. Проведено моделирование процесса уширения спектра в азотной, аргонной и воздушной средах при различных давлениях газа для фемтосекундных лазеров, работающих на длинах волн 775, 800 и 940 нм с различной энергией в импульсе, результаты сравниваются как с известными данными, так и с проведенным экспериментом.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научно-го фонда в рамках гранта № 23-22-00023.*

## Литература

1. A. Braun, G. Korn, X. Liu, D. Du, J. Squier, G. Mourou, *Opt. Lett.*, 20(1), 73–75 (1995).
2. Д.В. Апекумов, С.Н. Багаев, Ю.Э. Гейнц и др., под общ. ред. С.Н. Багаева, Г.Г. Матвиенко. Фемтосекундная атмосферная оптика. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 237 с.
3. J. Daigle, T.J. Wang, S. Hosseini, S. Yuan, G. Roy, S.L. Chin, *Appl. Opt.*, 50(33), 6234–6238 (2011).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ СПЕКТРОВ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ NV-ЦЕНТРОВ АЛМАЗОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРИЛОЖЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

О. И. Лыга<sup>1</sup>, М. А. Шулепов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г. Томск, [lyga.olga@gmail.com](mailto:lyga.olga@gmail.com)*

<sup>2</sup>*Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, г. Томск*

Сегодня, поиск новых материалов для более совершенной работы приборов микроэлектроники, датчиков магнитного поля, квантовых гироскопов имеет стратегическую значимость. Так как использование привычных материалов (кремний, арсенид галлия и т.д.) в данных устройствах вызывает ряд сложностей: довольно узкий температурный диапазон использования, не устойчивы к радиационному воздействию, агрессивным средам.

Поэтому наиболее широко обсуждаемым вариантом на сегодняшний день является использование алмаза с NV-центрами. Свойства NV-центров делают их привлекательными для разнообразных приложений – квантовые компьютеры, квантовые сенсоры, квантовые коммуникации [1].

В данной работе рассматривается влияние приложенного магнитного поля на NV – центры (NV<sup>0</sup>, NV<sup>-</sup>, N<sub>2</sub>V) алмазных образцов.

Возбуждение фотолюминесценции осуществлялось диодными лазерами. Регистрация спектров фотолюминесценции производилась в температурном диапазоне от 14 К до 360 К. Были определены температурные зависимости NV-центров и установлено влияние магнитного поля на данные центры в алмазном образце. Изменение спектров фотолюминесценции связано с эффектом Зеемана.

*Исследование было выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2020-0048.*

### Литература

1. K. Jensen, P. Kehayias, D. Budker, “Magnetometry with Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond,” in: High Sensitivity Magnetometers. Ed. by A. Grosz, M.J. Haji-Sheikh, S.C. Mukhopadhyay. Berlin: Springer, 2017. pp. 553–576.

## РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ХАНЛЕ И БЕЛЛА-БЛУМА ДЛЯ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ КВАНТОВОЙ МАГНИТОМЕТРИИ

А. О. Макаров<sup>1,2</sup>, В. И. Вишняков<sup>1</sup>, Д. В. Бражников<sup>1,2</sup>,  
А. Э. Бонерт<sup>1</sup>, А. Н. Гончаров<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>*Институт лазерной физики СО РАН,  
Россия, г. Новосибирск, [werklore@mail.ru](mailto:werklore@mail.ru)*

<sup>2</sup>*Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,  
Россия, г. Новосибирск*

<sup>3</sup>*Новосибирский государственный технический университет,  
Россия, г. Новосибирск*

Высокочувствительные квантовые атомные магнитометры (АМ) представляют большой интерес для приложений как в области прикладных исследований (медицинская диагностика, детектирование предвестников землетрясений и др.), так и в области фундаментальной физики. Для многих приложений миниатюризация АМ, снижение энергопотребления и тепловыделения имеет принципиальное значение. Современные высокочувствительные миниатюрные АМ используют атомы рубидия или цезия и работают в режиме подавленной спин-обменной релаксации (SERF), для которого требуется относительно высокая температура газовой ячейки (150–200 °С).

В нашей работе предложены два метода регистрации магнитооптических резонансов (МОР) в миниатюрных ( $\sim 0,1 \text{ см}^3$ ) ячейках с парами  $^{87}\text{Rb}$  при температуре не более 80 °С. Снижение рабочей температуры сенсора крайне важно для некоторых приложений, в особенности в медицинской диагностике. Первый метод представляет собой развитие метода Белла-Блума для скалярных измерений магнитного поля с оптической накачкой атомов амплитудно-модулированным светом. Вместо циркулярной поляризации волны накачки мы предлагаем использовать эллиптическую поляризацию в комбинации с поляриметрической техникой регистрации резонанса. Второй метод основан на широко используемом методе Ханле (резонансы пересечения в нулевом магнитном поле). В предложенной нами модификации этого метода используются два встречных линейно поляризованных пучка, а МОР регистрируется в сигнале, пропорциональном углу вращения поляризации одного из них. Экспериментально нами был зарегистрирован необычно большой угол поворота поляризации (22°). Оценка предельно достижимой чувствительности АМ находится в диапазоне 10–100 фТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ , что соответствует наилучшим коммерческим АМ, работающим в режиме SERF.

*Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку Российскому научному фонду (грант № 23-12-00195).*

## ФОТООКИСЛЕНИЕ ТЕТРАГИДРОБИОПТЕРИНА В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

Д. А. Макарова<sup>1</sup>, А. С. Низамутдинов<sup>1</sup>, А. А. Буглак<sup>2</sup>, Т. А. Телегина<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, г. Казань,  
[makarovadaryaaa@mail.ru](mailto:makarovadaryaaa@mail.ru), [anizamutdinov@mail.ru](mailto:anizamutdinov@mail.ru)

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет,  
Россия, г. Санкт-Петербург, [andreybuglak@gmail.com](mailto:andreybuglak@gmail.com)

<sup>3</sup>Институт биохимии им. А. Н. Баха, ФИЦ «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН, Россия, г. Москва, [telegina@inbi.ras.ru](mailto:telegina@inbi.ras.ru)

Нарушение меланогенеза приводит к развитию ряда патологий, включая витилиго. Тетрагидробиоптерин в качестве кофермента фенилаланингидроксилазы участвует в окислении фенилаланина в тирозин. Существует гипотеза, что избыток тетрагидробиоптерина приводит к накоплению пероксида водорода [1]. А это либо способствует индукции GTF-циклогидролазы, либо приводит к окислительному стрессу.

Идея выхода из данного «замкнутого круга» заключается в воздействии светом УФ диапазона спектра на окисление птеринов, что способствует димеризации исходного вещества. Эффективный спектр ультрафиолетовых (УФ) лучей расположен в диапазоне 296–313 нм. Кроме того, полагают, что наночастицы благородных металлов могут действовать как антиоксиданты благодаря их высокой каталитической активности [2].

Динамика окисления тетрагидробиоптерина была исследована методом оптической абсорбционной спектроскопии. При облучении птеринов УФ светодиодом непрерывного действия (325 нм) была обнаружена полоса поглощения димеров в диапазоне 245 нм. Для импульсно-периодического облучения лазерным светом (310 нм) был обнаружен выход димеров в диапазонах 245 нм и 275 нм. Эксперименты с добавлением наночастиц PAPLAL показали, что их повышенная концентрация катализирует окисление тетрагидробиоптерина, а небольшое добавление оказывает положительный эффект, причем, как при авто-, так и при фотоокислении. Максимальное значение квантового выхода составило (0,6±0,04) % при непрерывном облучении диодом и (0,9±0,04) % при фотоокислении с добавлением наночастиц.

### Литература

1. P.A. Vieyra-Garcia, P. Wolf, *Pharmacol. Ther.*, 222, 107784 (2021).
2. A.A. Buglak, T.A. Telegina, T.A. Lyudnikova, Y.L. Vechtomova, M.S. Kritsky, *Photochem. Photobiol.*, 90(5), 1017–1026 (2014).

## НОВЫЕ ЦЕНТРЫ ОКРАСКИ КОРОТКОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА ВО ФТОРИДАХ НАТРИЯ И ЛИТИЯ

Н. Т. Максимова, Д. Д. Мирошник, А. И. Евдокимова

*Иркутский государственный университет,  
Россия, г. Иркутск, [Natmax\\_2001@mail.ru](mailto:Natmax_2001@mail.ru)*

Исследования, направленные на разработку новых материалов в качестве элементов оптической памяти, а также для записи полноцветной информации, предполагают использование люминесцирующих кристаллов RGB диапазона [1]. В этой связи представляют интерес центры голубой люминесценции, обнаруженные в LiF [2]. В кристаллах фторида натрия под действием ионизирующего излучения формируются собственные дефекты решетки, аналогичные дефектам в LiF. Особенностью NaF является сдвиг основных полос поглощения центров окраски в длинноволновую сторону. Этот факт открывает возможность изучения дефектов коротковолнового диапазона, представляющих сложность наблюдения в LiF. Целью работы было изучение природы дефектов, обнаруженных в NaF в коротковолновом диапазоне спектра, и выяснение возможности формирования таких дефектов в LiF. Кристаллы NaF и LiF были выращены в вакууме по методу Стокбаргера, а также по методу Киропулоса на воздухе с добавками кислорода и гидроксила. Радиационные дефекты создавались гамма-квантами в диапазоне экспозиционных доз  $2,58 \cdot 10^3 - 12,9 \cdot 10^4$  Кл/кг. Оптическая обработка проводилась с целью выяснения структуры центров, ответственных за полосы с максимумами 230, 270, 303 и 312 нм. Обесцвечивание проводилось диодным источником с длиной волны 365 нм, а также лазерными источниками 405 нм и 450 нм. Установлено, что новые полосы поглощения в коротковолновом диапазоне NaF, являются продуктами радиолиза примесных ионов кислорода. Обнаружено, что в таких кристаллах идет образование F-центров вблизи кислородных комплексов. При 300 К такие F-центры эффективно разрушаются при фотоионизации за счет отрыва электрона и диффузии анионной вакансии. Результатом является образование  $F_2^+$  центров в комплексе с кислородом. В вакуумных кристаллах в ходе аналогичных преобразований фотоионизации F-центров не происходит и, соответственно, появления  $F_2^+$  центров не наблюдается. Обсуждаются механизмы аналогичных процессов в кристаллах LiF.

### Литература

1. Е.Ф. Мартынович, Е.О. Чернова, В.П. Дресвянский. Способ записи полноцветных люминесцентных изображений в объеме оптического носителя. Патент РФ № 2653575С1, кл. С03В33/09, В44F1/06. 2018.
2. N.T. Maksimova, V.M. Kostyukov, *AIP Conf. Proc.*, 2069, 020006 (2019).

## О ВЛИЯНИИ СОБСТВЕННЫХ ДЕФЕКТОВ БОРОСИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ, СОДЕРЖАЩИХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ИОНЫ, НА ИХ СТРУКТУРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Е. В. Мальчукова<sup>1</sup>, В. С. Левицкий<sup>1</sup>, Н. Г. Тюрнина<sup>2</sup>, З. Г. Тюрнина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Россия, г. Санкт-Петербург, [evguenia.malchukova@polytechnique.edu](mailto:evguenia.malchukova@polytechnique.edu), [lev-vladimir@yandex.ru](mailto:lev-vladimir@yandex.ru)

<sup>2</sup>Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН, Россия, г. Санкт-Петербург, [turnina.ng@iscras.ru](mailto:turnina.ng@iscras.ru)

В перспективе долгосрочного захоронения ядерных отходов изучение структурной эволюции упрощенного ядерного стекла при включении актинидных элементов имеет большое значение для лучшего понимания их влияния на изменения локального окружения элементов внутри стекляннной матрицы. К сожалению, актиниды являются радиоактивными элементами. Поэтому для предсказания поведения стекляннной матрицы, используются их заменители – редкоземельные (РЗ) ионы, так как их электронная структура и химические свойства придают им схожее поведение с актинидами при введении в стекло. Обширная работа по стекляннным системам, допированным РЗ элементами, была представлена в [1]; основное внимание в ней уделялось радиационным эффектам в исходной стеклообразной системе и влиянию ионов РЗ металлов на основную структуру матрицы стекла при введении Sm, Gd, Eu, Ce и Nd ионов. Так, было показано, что радиационно-индуцированные структурные изменения в алюмоборосиликатных (АБС) стеклах, допированных РЗ элементами, а именно, уплотнение и полимеризация матрицы стекла, образование молекулярного кислорода и появление радиационных дефектов, резко уменьшаются при содержании поливалентных РЗ ионов (Ce, Sm и Eu) [1]. Однако причина, по которой количество дырочных дефектов превышает количество электронных дефектов в облученных образцах стекла, до сих пор неясна. Возможно, это согласуется с предположением о различных типах дефектов-предшественников, существующих в структуре стекла после синтеза [2].

В данной работе представлены люминесцентные и микроструктурные результаты, касающиеся внедрения ионов Ce и Gd в боросиликатные стекла, содержащие также следы примеси Eu, и их влияние на образование дефектов-предшественников. Показано, что интенсивность люминесценции кислород-дефицитных центров (КДЦ), рассматриваемых в качестве предшественников радиационных электронных дефектов, увеличивается при одновременном присутствии ионов Ce, Gd и Eu и нелинейно изменяется с содержанием Ce, Gd. Этот результат коррелирует с процессом полимеризации исследуемого стекла – параметр  $Q^3/Q^2$  ( $Q^n$  – структурная единица  $SiO_n$  с  $n$ -мостиковыми атомами кислорода) изменяется с содержанием РЗ содопантов также нелинейно. Влияние содопирования РЗ эле-



ментами на структуру АБС стекла и люминесцентные свойства объясняются наличием различных зарядовых состояний РЗ ионов, а также их различными структурными позициями в структуре АБС стекла.

### Литература

1. E.V. Malchukova, A.I. Nepomnyashchikh, B. Boizot, E.I. Terukov, *Glass Phys. Chem.*, 44(4), 356–363 (2018).
2. E. Malchukova, “Influence of the Doping Ion Nature and Content on Defect Creation Processes under the Effect of Ionizing Radiation in Aluminoborosilicate Glasses,” in: *Recent Techniques and Applications in Ionizing Radiation Research*. Ed. by A.M. Maghraby, B. Almayahi. London: IntechOpen, 2020. pp. 133–150.

## ЕДИНИЧНЫЕ ЦЕНТРЫ ОКРАСКИ В ШИРОКОЗОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

Е. Ф. Мартынович, В. П. Дресвянский

*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН,  
Россия, г. Иркутск, [femto@bk.ru](mailto:femto@bk.ru)*

Интерес к изучению люминесценции одиночных центров определяется потребностями развития теоретических представлений о взаимодействии света и вещества, а также разработкой различных приложений [1–2]. Центры окраски в различных кристаллах широко используются в качестве рабочих центров детекторов различных излучений, оптических носителей для записи и хранения визуальной и цифровой информации [3–5], в методах исследования высоконелинейного взаимодействия интенсивного лазерного излучения с веществом [6; 7]. Актуальна разработка новых принципов спектроскопической дифференциации радиационных дефектов и других квантовых систем по характеристикам люминесценции единичных центров [8; 9]. В последние годы стали актуальными исследования, направленные на развитие квантовых технологий с применением единичных центров [10].

Исследования проведены в основном с помощью конфокального сканирующего люминесцентного микроскопа MicroTime 200, работающего в режиме время-коррелированного счета одиночных фотонов. Впервые исследована проблема изменения характеристик траекторий интенсивности люминесценции и величин постоянных времени затухания люминесценции одиночных квантовых систем в конденсированных средах неоднородными внутрикристаллическими полями в условиях, когда невозможно зарегистрировать неоднородное уширение их спектральных линий, вследствие их огромного электронно-колебательного уширения. Доказано, что обобщенные временные характеристики траекторий интенсивности (рис.), такие как средняя продолжительность on- и off-интервалов или их отношения могут служить дополнительными спектроскопическими признака-

ми для идентификации и дифференциации электронно-колебательных квантовых систем.

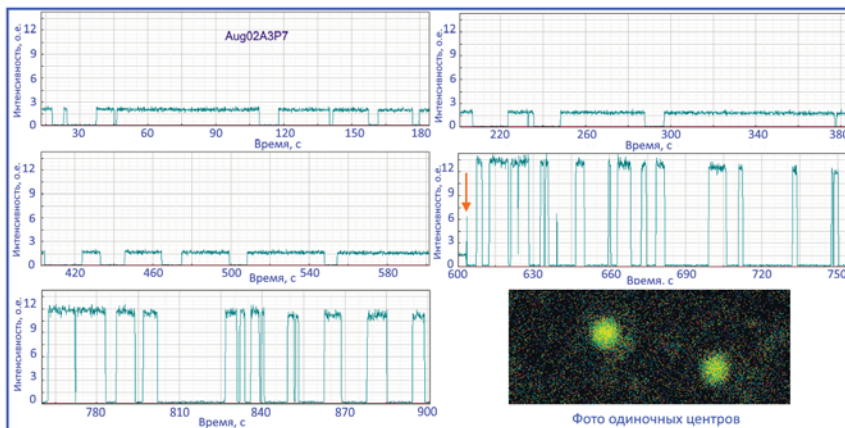


Рис. Конфокальные сканированные люминесцентные изображения одиночных центров окраски. Траектория интенсивности люминесценции единичного центра при двух разных значениях интенсивности возбуждающего излучения от 0 до 900 с. Момент переключения интенсивности возбуждения показан красной стрелкой

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Плана фундаментальных исследований РАН на период до 2025 г. (проект № 0243-2021-0004).*

## Литература

1. William E. Moerner. Nobel Lecture, December 8, (2014).
2. Ерёмчев И.Ю., Ерёмчев М.Ю., Наумов А.В. *УФН*, 189, № 3, 312-322, (2019).
3. Martynovich E.F., Chernova E.O., Dresvyansky V.P., et. al. *Optics & Laser Technology*, 131, (2020).
4. Мартынович Е.Ф., Патент РФ на изобретение № 2781512 C1, 12.10.2022.
5. Мартынович Е.Ф., Патент РФ на изобретение № 2758567 C1, 29.10.2021.
6. Martynovich E.F., Dresvyansky V.P., Rakevich A.L., Lazareva N.L., et. al. *Applied Physics Letters*. 114, № 12, 121901. (2019).
7. Martynovich E.F., Lazareva N.L., Zilov S.A. *Journal of Luminescence*, 234, 117989 (2021).
8. Krivosheev N.D, Zilov S.A., Dresvyanskiy V.P., Martynovich E.F., *Journal of Luminescence*, 257, 119688 (2023).
9. Мартынович Е.Ф., Зилов С.А., Дресвянский В.П., *Опт. и спектр.*, 131, №5, 667-675, (2023).
10. Smith J. M., Meynell S. A., Bleszynski Jayich A.C., Meijer J., *Nanophotonics* 2019; 8, №11, 1889–1906 (2019).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТВЕРДОТЕЛЬНОМ МИКРОЧИП-ЛАЗЕРЕ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ С ВЫХОДОМ НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ

Е. А. Владимирова, И. П. Кузьменко, Е. Ф. Мартынович

*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН, Россия, г. Иркутск,  
[femto@bk.ru](mailto:femto@bk.ru)*

*Иркутский государственный университет, Россия, г. Иркутск*

Исследована форма импульсов генерации излучения диодного лазера накачки (808 нм), первой (1064 нм) и второй (532 нм) гармоник излучения твердотельного  $\text{YVO}_4\text{-Nd}^{3+}$  лазера при подаче прямоугольного импульса электропитания на лазерный диод накачки. Использовалась продольная схема накачки микрочипа. Микрочип представлял собой склейку кристаллического лазерного элемента и кристалла-генератора второй гармоники  $\text{KTiOPO}_4$ . На полированные торцы микрочипа были напылены дихроичные зеркальные покрытия, представляющие собой оптический резонатор лазера. Входное зеркало обеспечивало беспрепятственное прохождение излучения накачки 808 нм и максимально отражало обратно в резонатор излучение первой и второй гармоник твердотельного лазера.

Выходное зеркало максимально отражало внутрь резонатора излучение первой гармоники и пропускало излучение второй гармоники. Таким образом, основным излучением, выходящим из резонатора, было излучение второй гармоники с длиной волны 532 нм. Вместе с тем, измерения с помощью спектрометра Ocean Optics QE65000 показали, что в спектре выходного излучения содержатся также вполне измеримые по интенсивности линии излучения и лазера накачки и первой гармоники. Это позволило исследовать динамику излучения всех трех лазерных линий, которые выделялись из общего спектра с помощью светофильтров. Измерения проведены при различных величинах тока лазерного диода, начиная от порога генерации до предельно допустимого значения. Для примера на рис/ показаны импульсы генерации для тока питания лазерного диода накачки 2,6 А.

Как показали результаты измерений, ни при каких режимах не реализовывалась генерация в форме затухающих периодических пиков [1],



Рис. Осциллограммы при значении тока накачки 2,6 А для: а – лазерного диода 808 нм; б – первой гармоники; в – второй гармоники. Указана цена делений на экране осциллографа

которая обычно реализуется в теоретических расчетах для одномодовой генерации. На практике лазер генерирует несколько мод, из-за этого возникает конкуренция мод, которая и приводит к хаотичности пульсаций на выходе.

*Работа выполнена в рамках Плана фундаментальных исследований РАН на период до 2025 г., проект № 0243-2021-0004.*

### Литература

1. А.А. Афоненко, И.С. Манак. Кинетическая теория полупроводниковых инжекционных лазеров: Конспект лекций по одноименному спецкурсу для студ. спец. Н 02.03 – "Физическая электроника". Минск: Белгосуниверситет, 1998. 69 с.

## ГЕНЕРАЦИЯ ЭКСИЛАМПАМИ ИМПУЛЬСОВ ИЗЛУЧЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Д. С. Глазунов, Е. Ф. Мартынович

*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН,  
Россия, г. Иркутск, femto@bk.ru*

Время нарастания люминесценции в модели двухуровневого центра равно постоянной времени её затухания. Поэтому для эффективного возбуждения длительно затухающей люминесценции, длительность импульса возбуждения должна быть сравнимой с постоянной времени затухания. Эксилампы на основе барьерного разряда работают за счет токов смещения и требуют для своего питания импульсное высокочастотное напряжение порядка 30–100 кГц [1]. На каждый импульс такого питания они выдают пару импульсов излучения на фронте и спаде питающих импульсов (рис., а). Длительность генерируемых импульсов излучения имеет порядок  $10^{-7}$  с.

Задачей работы было создание системы питания эксиламп, обеспечивавшей генерацию световых импульсов с переменной длительностью, регулируемой в широких пределах в микро- и миллисекундном диапазонах. Для этого было решено питать лампу пачками высокочастотных импульсов с перестраиваемой длительностью пачки.

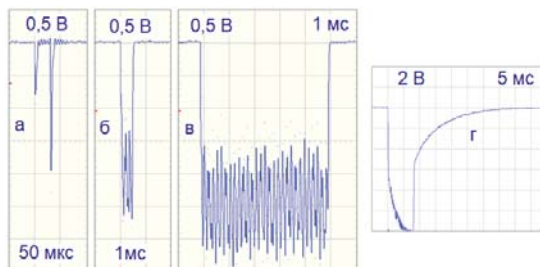


Рис. Осциллограммы импульсов УФ излучения эксилампы K<sub>2</sub>CrCl<sub>4</sub> (а, б, в) и импульса люминесценции кристалла алмаза (г). Числами указаны значения цены деления по вертикали в вольтах и по горизонтали в мкс и мс. Цифровой осциллограф PCSU1000

Данная задача была решена. Некоторые результаты показаны на рисунке. Лампа была использована для исследования кинетики люминесценции различных люминесцирующих сред.

### Литература

1. Д.В. Шитц, М.В. Ерофеев, В.С. Скакун, В.Ф. Тарасенко, С.М. Авдеев, *Приборы и техника эксперимента*, № 6, 114–118 (2008).

## МАТЕРИАЛЫ С ВРЕМЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ

А. И. Минибаев, А. В. Харитонов, С. С. Харинцев

*Казанский (Приволжский) федеральный университет,  
Россия, г. Казань, [ajdiminibaev@stud.kpfu.ru](mailto:ajdiminibaev@stud.kpfu.ru)*

На сегодняшний день основным способом управления оптическим излучением является использование метаматериалов, дизайн которых позволяет реализовывать среды с отрицательным коэффициентом преломления, а также создавать суперлинзы сверхвысокого разрешения. Все эти особенности основаны на пространственной неоднородности метаматериалов. Но в последнее время большое внимание привлекают к себе среды с временной неоднородностью, именно появление новых нелинейных материалов стало катализатором роста интереса к ним. Под временной неоднородностью понимается быстрое изменение свойств всей среды со временем много меньшим периода колебания волны. В данных временных интерфейсах наблюдается изменение частоты распространяющегося света внутри материала, а также подобно границе раздела двух сред, возникают волны, которые отражаются в пространстве и распространяются в обратном направлении. Данные неординарные свойства материалов с временными неоднородностями позволяют создать не взаимность в среде.

Электромагнитный отклик подобных метаматериалов зависит от структуры временной неоднородности: время переключения, глубина модуляции и профиля. В большинстве работ авторы считают переключение мгновенным, а это означает, что рассматриваемая среда является бездисперсионной, чего в действительности редкое явление. Такое приближение приводит к сильному упрощению модели взаимодействия света со средой. Поэтому в нашей работе мы проводим исследование влияния параметров временной неоднородности на электромагнитный отклик в средах с дисперсией. Методом конечных разностей, моделируем различные временные интерфейсы, и анализируем влияния их форм на эффективность преобразования частоты света.

## СВЕРХЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ N3-ЦЕНТРОВ В АЛМАЗЕ

В. П. Миронов

*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН,  
Россия, г. Иркутск*

Центр N3 привлекателен излучением в синей области спектра. Рендом и Де Шазером сделана безуспешная попытка получить генерацию на N3, обнаружено поглощение из возбужденного состояния. Перспективность использования этих центров считалась невысокой.

При возбуждении рентгеновским излучением, полосы поглощения и люминесценции N3-центров совпадают по положению в спектре с A-полосой. Системы взаимодействуют сложным образом. При высокой концентрации N3 центров ( $10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) и высокой концентрации A-дефектов ( $10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) возбуждение N3 центров реализуется по двум каналам (рис., а). Во-первых, реализуется процесс возбуждения за счет переноса энергии электронов проводимости на высокие возбужденные состояния N3 центров, в результате чего уровень A<sub>2</sub> становится заселенным.

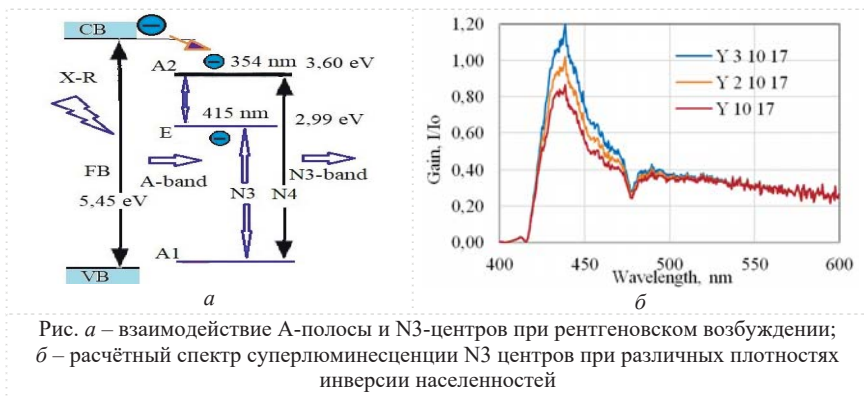


Рис. а – взаимодействие А-полосы и N3-центров при рентгеновском возбуждении;  
б – расчётный спектр суперлюминесценции N3 центров при различных плотностях  
инверсии населенностей

Во-вторых, возбуждается переход A<sub>1</sub>=>E за счет абсорбции существенной части излучения А-полосы, в результате чего уровень E также заселяется и возникает инверсия относительно колебательных повторений состояния A<sub>1</sub>. Однако, в отличие от оптического возбуждения, в данном случае уровень A<sub>2</sub> заполнен, в результате чего разрешенный переход E=>A<sub>2</sub> не реализуется, канал снижения инверсии становится закрытым. При достаточно интенсивном возбуждении возникает инверсия населенностей, достаточная для появления сверхлюминесценции (рис., б).

Таким образом, высвечивание N3-центров при рентгеновском возбуждении в присутствии А-полосы обусловлено сверхлюминесценцией. Это открывает перспективы создания лазера на основе алмаза с N3 центрами и рентгеновской накачкой.

## ДВУХФОТОННАЯ КОНФОКАЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ – МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ В ОБЪЕМЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО КРИСТАЛЛА

В. П. Калинушкин, С. А. Миронов, А. А. Гладилин,  
М. С. Сторожевых, О. В. Уваров

*Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН,  
Россия, г. Москва, [sa.mironov@kapella.spi.ru](mailto:sa.mironov@kapella.spi.ru)*

Исследование структурных дефектов кристаллов сложная фундаментальная и практическая задача. Основными методами являются микроратодолуминесценция, метод наведенного тока, селективное травление и т. д. Однако большинство из них исследуют объект в приповерхностной области. В данной работе используется метод двухфотонной конфокальной микроскопии. В докладе демонстрируются возможности метода для изучения спектров люминесценции и рекомбинационных характеристик дефектов в объеме кристаллов на глубине до 3 мм от поверхности (рис.).

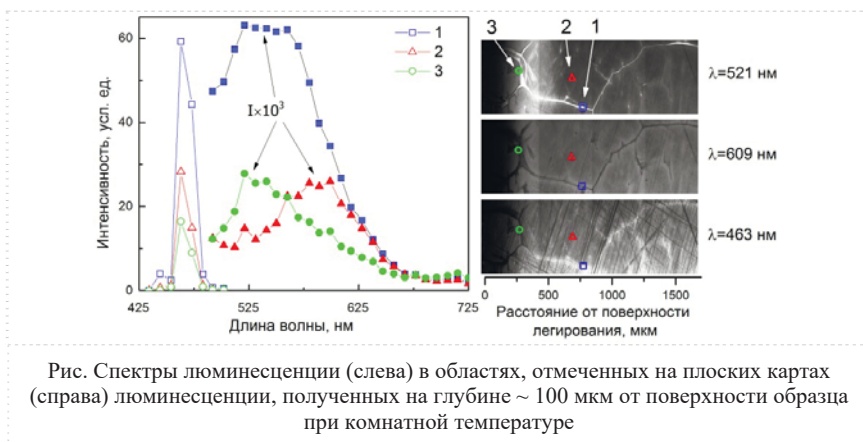


Рис. Спектры люминесценции (слева) в областях, отмеченных на плоских картах (справа) люминесценции, полученных на глубине  $\sim 100$  мкм от поверхности образца при комнатной температуре

Приводятся результаты исследования спектров люминесценции в видимом диапазоне атмосфер границ зерен CVD-ZnSe и влиянию на них легирования железом, хромом и других элементов и отжига в атмосфере аргона, цинка и селена. Дается оценка примесно-дефектного состава полупроводника. Демонстрируется эффект ускоренной диффузии по границам зерен.

## ОПТИМИЗАЦИЯ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ МАЛОГАБАРИТНОГО CO<sub>2</sub> ЛАЗЕРА ДЛЯ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОГО ГАЗОАНАЛИЗАТОРА SF<sub>6</sub>

К. Г. Зенов<sup>1</sup>, А. И. Карапузиков<sup>1,2</sup>, М. Б. Мирошниченко<sup>1</sup>,  
Е. Г. Нехорошева<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ООО «Специальные технологии», Россия, г. Новосибирск, [mirmb1989@gmail.com](mailto:mirmb1989@gmail.com)

<sup>2</sup>Институт лазерной физики СО РАН, Россия, г. Новосибирск

<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет, Россия, г. Новосибирск

SF<sub>6</sub> (элегаз) широко используется в высоковольтной технике в качестве газового изолятора. Для предотвращения техногенных аварий необходимо контролировать утечки газа в процессе эксплуатации оборудования. Оптико-акустическая спектроскопия является одним из наиболее чувствительных методов контроля концентрации SF<sub>6</sub>. Для эффективного мониторинга утечек элегаза наилучшим образом подходит CO<sub>2</sub> лазер, способный генерировать излучение на линиях соответствующих спектру поглощения SF<sub>6</sub> в воздухе. В данной работе представлена упрощенная математическая модель, а также результаты экспериментальных исследований, направленных на оптимизацию спектрального состава выходного излучения малогабаритного волноводного CO<sub>2</sub>-лазера для использования в мониторинге SF<sub>6</sub>.

Цель исследования заключается в повышении точности измерений оптико-акустического газоанализатора на основе CO<sub>2</sub> лазера, методом исключения нежелательных линий из спектра излучения лазера без использования дорогостоящих элементов селекции.

В ходе экспериментальных исследований решались две задачи:

1. Определение параметров активной среды и резонатора для достижения генерации исключительно на сильных линиях 10P-ветви 10 мкм диапазона.

2. Определение влияния изменения длины резонатора в пределах ~ 1 мм для полного исключения генерации нежелательных линий R-ветви.

На основе комплекса теоретических и экспериментальных исследований был разработан алгоритм оптимизации параметров активной среды и резонатора малогабаритных волноводных CO<sub>2</sub>-лазеров с ВЧ-возбуждением, который позволяет управлять сигналами лазерного излучения и, в частности, исключать генерацию на 10 мкм линиях 10R-ветви без использования дополнительных элементов селекции.

В ходе работ на протяжении более трех лет были измерены параметры различных лазеров с небольшими изменениями в размерах номинальной длины резонатора и взаимного расположения конструктивных элементов, что позволило собрать представленную в работе статистику. Всего было оптимизировано 64 лазера. За время наблюдений не было зарегистрировано отказов лазеров, изготовленных по данной технологии селекции длин волн, что свидетельствует о высокой надежности изделий и метода селекции и дает основания для расширения областей их применения.



## ЛАЗЕРНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ ЦЕНТРОВ В ОБЪЕМЕ НАНОПОРИСТОГО СТЕКЛА, ДОПИРОВАННОГО ВИСМУТОМ

Ю. В. Михайлов, Т. О. Липатьева, С. С. Федотов, М. З. Зиятдинова,  
И. С. Глебов, В. Н. Сигаев, А. С. Липатьев

*Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,  
Россия, г. Москва, [golpertm@icloud.com](mailto:golpertm@icloud.com)*

Нанопористое стекло (НПС) это материал, получаемый путем выщелачивания подверженного метастабильной ликвации натриевоборосиликатного стекла и обладающий однородной губчатой структурой с контролируемым размером пор в пределах 5–200 нм [1]. Важной особенностью НПС является возможность его импрегнирования соединениями висмута, что позволяет получать заготовки для вытяжки активного оптического волокна с меньшей степенью кластеризации активных центров при высокой концентрации допанта [2]. Кроме того, висмутсодержащие НПС перспективны для фемтосекундного лазерного модифицирования с целью разработки долговечной оптической памяти и записи активных волноводов, однако к настоящему времени число работ в этой области ограничено [3].

В данной работе была изучена возможность создания микроразмерных точечных и линейных структур с люминесцирующими центрами в объеме НПС при различных параметрах лазерной экспозиции. С помощью микроспектрометра NTegra Spectra при возбуждении на длине волны 488 нм обнаружено, что пропитывание НПС в растворе нитрата висмута приводит к возникновению оранжевой полосы люминесценции, которая обусловлена димеров  $\text{Bi}^{2+}\text{-Bi}^{2+}$  и значительно усиливается в областях, модифицированных лазерным пучком. Проведение количественной фазовой микроскопии показало, что активация НПС висмутом при энергиях лазерных импульсов 200 и более нДж позволяет увеличить фазовый контраст у записанных структур.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10231.*

### Литература

1. Т. Antropova, *Opt. Appl.*, 38(1), 5–16 (2008).
2. Е.М. Dianov, L. Yang, L.D. Iskhakova, V.V. Vel'miskin, Е.А. Plastinin, F.O. Milovich, V.M. Mashinsky, S.V. Firstov, *Quantum Electron.*, 48(7), 658–661 (2018).
3. Z. Lijing, R.A. Zakoldaev, M.M. Sergeev, A.B. Petrov, V.P. Veiko, A.P. Alodjants, *Nanomaterials*, 11(1), 123 (2021).

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ЦЕНТРОВ $Mn$ В $YAl_3(BO_3)_4:Mn$

А. Д. Молчанова, К. Н. Болдырев, М. Н. Попова

*Институт спектроскопии РАН,  
Россия, г. Троицк, [nastyamolchanova@list.ru](mailto:nastyamolchanova@list.ru)*

Кристаллы иттрий-алюминиевого бората  $YAl_3(BO_3)_4$  (YAB) имеют структуру минерала хантита  $CaMg_3(CO_3)_4$  с нецентросимметричной пространственной группой  $R32$  тригональной системы [1]. Призмы  $YO_6$  изолированы друг от друга, не имея общих атомов кислорода, что в случае замещения ионов  $Y^{3+}$  ионами редкоземельных или переходных металлов приводит к слабому тушению люминесценции [2]. Это свойство, наряду с высокой оптической нелинейностью, отличными физическими характеристиками и химической стабильностью, делает YAB чрезвычайно интересным для многих приложений. Кристаллы YAB, легированные ионами различных редкоземельных и переходных металлов, являются хорошо известными люминофорами, перспективными для использования в качестве материалов для дисплеев, лазеров, сцинтилляторов, светодиодов, люминесцентных термометров и в медицинской визуализации (см., например, [3; 4]). Соединения с  $Mn^{3+}(d^4)$  обладают широкополосной, чрезвычайно чувствительной к температуре люминесценцией в ближней ИК и видимой областях спектра, благодаря чему соединения с  $Mn^{3+}$  также являются актуальными материалами для термолюминесцентных сенсоров.

Во время роста кристалла  $Mn^{3+}$  вводился в виде  $Mn_2O_3$ , поэтому можно было ожидать присутствия ионов  $Mn^{3+}$ . В ИК-диапазоне спектров люминесценции YAB:Mn при низких температурах наблюдались спин-запрещенные переходы  ${}^1T_2 \rightarrow {}^3T_1$  и  ${}^1T_2 \rightarrow {}^5E'$ ,  ${}^5E''$   $Mn^{3+}(d^4)$  [5]. Широкая полоса излучения в оранжевой области спектра (около 630 нм) связана со спин-разрешенным переходом  ${}^5T_2 \rightarrow {}^5E$   $Mn^{3+}$ . Изучена температурная зависимость спектров люминесценции, в частности, узких бесфононных линий  ${}^1T_2 \rightarrow {}^3T_1$ . Используя экспериментальные спектроскопические данные и диаграмму Танабе–Сугано для конфигурации  $d^4$ , мы оценили параметр кристаллического поля  $Dq$  и параметр Рака  $B$  для  $Mn^{3+}$  в YAB:Mn.

*Работа поддержана грантом РФФ № 19-72-10132. А. М. и К. Б. входят в состав Ведущей научной школы РФ (НШ-776.2022.1.2).*

### Литература

1. N.I. Leonyuk, L.I. Leonyuk, *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.*, 31(3-4), 179–278 (1995).
2. E. Cavalli, N.I. Leonyuk, *Crystals*, 9(1), 44 (2019).
3. A.L. Moura, S.J.M. Carreño, P.I.R. Pincheira, Z.V. Fabris, L.J.Q. Maia, A.S.L. Gomes, C.B. de Araújo, *Sci. Rep.*, 6, 27107 (2016).
4. K. Elzbieciak-Piecka, L. Marciniak, *Sci. Rep.*, 12, 16364 (2022).
5. A. Molchanova, K. Boldyrev, N. Kuzmin, A. Velizhanin, K. Khaydukov, E. Khaydukov, O. Kondratev, I. Gudim, E. Mikliaeva, M. Popova, *Materials*, 16(2), 537 (2023).

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ МЕЖЗОННОЙ РЕЛАКСАЦИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ HgCdTe/CdHgTe ДЛЯ ЛАЗЕРОВ И ПРИЕМНИКОВ СРЕДНЕГО ИК ДИАПАЗОНА

С. В. Морозов

*Институт физики микроструктур РАН – филиал ФИЦ  
«Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН»,  
Россия, Нижегородская обл., д. Афонино, [more@ipmras.ru](mailto:more@ipmras.ru)*

В работе исследовались гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ) HgCdTe/CdHgTe для разработки на их основе межзонных источников и приемников излучения среднего и дальнего ИК диапазонов. Межзонные полупроводниковые лазеры на основе структур с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe имеют ряд свойств, делающих их привлекательными для длинноволновых лазеров. Например, за счёт сильно непараболических законов дисперсии электронов и дырок, квазисимметричных в окрестности  $k = 0$ , в таких структурах удаётся существенно подавить безызлучательную оже-рекомбинацию и увеличить её порог относительно объемных материалов твердых растворов HgCdTe от нескольких единиц до 30 – 40 мэВ. При существенном подавлении безызлучательной рекомбинации Шокли-Рида-Холла, важном механизме при рассмотрении перспектив таких структур в качестве межзонных приемников среднего и дальнего ИК диапазонов, при высокой концентрации неравновесных носителей заряда вопрос межзонной рекомбинации фактически сводится к традиционной конкуренции излучательной и безызлучательной оже-рекомбинации. В данной работе экспериментально и теоретически исследуются как фундаментальные процессы межзонной рекомбинации носителей заряда в подобных КЯ, определяющие достижимость усиления излучения в материале КЯ, так и смежные вопросы о влиянии конструкции диэлектрического волновода на возможность получения однопроходowego стимулированного излучения. Кроме того, по мере перехода к структурам с  $E_g$  меньше 100 мэВ становятся актуальны вопросы избыточного разогрева носителей заряда при накачке структур излучением с энергией фотонов, существенно превышающей  $E_g$ .

Исследовались спектры фотолюминесценции и стимулированного излучения (СИ) методами фурье-спектроскопии при импульсном и квазинепрерывном оптическом возбуждении CO<sub>2</sub>-лазером в серии структур с массивом КЯ на основе HgCdTe, помещённым в диэлектрический волновод. Структуры выращивались на полуизолирующей подложке GaAs(013), с ZnTe и CdTe буферами. Образцы отличались толщиной CdTe буферного слоя (10 или 15 мкм), что влияло на локализацию TE<sub>0</sub>-моды, в частности, на фактор оптического ограничения (Г-фактор).

В структурах со стандартной толщиной (10 мкм) технологического буфера CdTe при импульсном возбуждении удалось получить СИ на длинах волн 25 мкм и 31 мкм при температуре 8 К. В случае более коротковолнового СИ (25 мкм), при увеличении температуры с 8 до 60 К линия СИ сдвигалась до 17 мкм за счёт увеличения ширины запрещенной зоны. В структуре, в которой СИ наблюдалось на длине волны 31 мкм, сдвига в коротковолновую область с увеличением запрещенной зоны не наблюдается, что, как показывают расчеты, связано с резким увеличением поглощения излучения волноводной моды в GaAs подложке (модовых потерь) в области 25–31 мкм. В то же время локализация излучения в диапазоне длин волн 31 мкм и более достигается благодаря эффекту сильного отражения от подложки в полосе остаточных лучей GaAs.

Было установлено, что увеличение толщины CdTe буфера до 15 мкм позволяет уменьшить порог возникновения СИ на 1,5 порядка по сравнению со структурами со стандартной толщиной буфера за счет улучшения локализации TE<sub>0</sub> моды и, соответственно, уменьшения модовых потерь. Благодаря этому, при импульсном возбуждении удалось получить СИ на длине волны 27 мкм, непрерывно перестраивающееся в спектральном диапазоне 27 – 18 мкм при увеличении температуры с 8 до 72 К. Сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов модового усиления показывает, что максимальная величина материального усиления ограничивается разогревом носителей, который возникает из-за «активации» безызлучательной оже-рекомбинации для носителей заряда с энергией выше пороговой энергии оже-процесса с участием двух электронов и дырки (СНС-процесс).

В условиях квазинепрерывного возбуждения в структурах с толщиной буфера 15 мкм удалось получить СИ с шириной линии менее 0,5 мЭВ при интенсивности возбуждения 0,8–3 Вт/см<sup>2</sup> при температурах до 20 К. Полученные результаты позволяют рассчитывать на возможность реализации когерентных источников излучения на основе исследуемых структур при оптической накачке ККЛ среднего ИК диапазона. Такие «конвертеры» частоты излучения представляют интерес, так как создание инжекционного лазера на HgCdTe наталкивается на определённые трудности с легированием р-типа.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ проект № 22-12-00310.*

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ ДЕФЕКТОВ В КРИСТАЛЛАХ LiF ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

С. В. Мурзин, А. В. Кузнецов, Е. Ф. Мартынович, В. П. Дресвянский

*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН,  
Россия, г. Иркутск, [murzin\\_sv@list.ru](mailto:murzin_sv@list.ru)*

Кристаллы фторида лития находят широкое применение в оптике, фотонике и квантовой электронике. Обладая большой величиной запрещенных энергий, они обеспечивают светопропускание в широком спектральном диапазоне от вакуумного ультрафиолета до средней инфракрасной области. При воздействии на кристаллы фторида лития высокоэнергетического ионизирующего излучения в них создаются стабильные люминесцирующие дефекты – агрегатные центры окраски. В работах [1–3] было показано, что центры окраски в кристаллах LiF могут быть созданы при воздействии интенсивного фемтосекундного лазерного излучения. Процессы лазерно-индуцированного дефектообразования в кристаллах LiF протекают в условиях, когда взаимодействие света и вещества носит нелинейный характер [4]. В работе [5] авторами было показано, что решающую роль в этих процессах играют явления самофокусировки и филаментации возбуждающего лазерного излучения. Ранее в работах [6; 7] было показано, что номенклатура и соотношение различных типов центров окраски в кристалле LiF существенным образом зависят от условий облучения, длительности, энергии и частоты повторения фемтосекундных лазерных импульсов, а также от времени (продолжительности) воздействия возбуждающего лазерного излучения. Целью настоящего исследования являлось изучение эффективности (скорости) образования центров окраски в процессе облучения кристаллов фторида лития фемтосекундными импульсами первой и второй гармониками титан-сапфирового лазера.

При проведении экспериментов кристаллы LiF облучались титан-сапфировым лазером, генерирующим импульсы длительностью 50 фс, с частотой следования 10 Гц и энергией 2 мДж. Максимум спектра излучения первой гармоники данного лазера находится на длине волны 950 нм, а второй гармоники – 475 нм. В экспериментах был использован режим взаимодействия света с образцом, соответствующий условиям низкоапертурной внешней фокусировки, когда импульсы возбуждающего излучения лазера фокусируются с помощью линзы с большим фокусным расстоянием. В наших экспериментах излучение лазера фокусировалось с помощью линзы с фокусным расстоянием 500 мм. При облучении входная поверхность исследуемого образца располагалась на расстоянии 2 см перед точкой местоположения геометрического фокуса линзы, что позволяло избежать испарения, лазерного пробоя или иного разрушения образца. Эффективность лазерно-индуцированного дефектообразования оценивалась исходя из динамики изменения интенсивности полос фотолюминес-

ценции  $F_2$  и  $F_3^+$  центров окраски. Полосы поглощения данных двух типов центров окраски практически полностью перекрываются, формируя композитную M-полосу поглощения с максимумом – 441 нм. Для возбуждения люминесценции в наших экспериментах использовалось излучение непрерывного лазера с длиной волны 450 нм. Для ослабления рассеянного возбуждающего лазерного излучения, люминесценция регистрировалась через интерференционный светофильтр с Г-образной спектральной характеристикой пропускания с длиной волны отсечки 475 нм. Спектры фотолюминесценции регистрировались в ходе облучения кристаллов фемтосекундным лазерным излучением в течение 20 мин. Запись спектров проводилась через каждые 10 с спектрометром Ocean Optics 65000. На время (2 с) регистрации спектров возбуждающее фемтосекундное излучение прерывалось. Также была проведена регистрация спектров фотолюминесценции в течение 20 мин, после облучения кристаллов фемтосекундным лазерным излучением, в процессе пострадиационной релаксации.

Данные экспериментальных исследований показали, что появление первых центров окраски в процессе дефектообразования происходит в течение 1–2 с после начала облучения. При этом, в случае воздействия первой гармоникой фемтосекундного лазерного излучения, рост интенсивности фотолюминесценции, т. е. концентрации,  $F_3^+$  центров в процессе облучения кристаллов происходит быстрее, чем рост концентрации  $F_2$  центров. После снятия фемтосекундного возбуждения, в процессе пострадиационной релаксации накопление  $F_2$  и  $F_3^+$  центров окраски происходит примерно с одинаковой скоростью. В то же время результаты при облучении второй гармоникой, в эксперименте наблюдалась противоположная ситуация – скорость генерации  $F_2$  центров была выше, чем для  $F_3^+$  центров окраски.

Механизм создания центров окраски под действием фемтосекундного лазерного излучения включает нелинейную генерацию электронно-дырочных пар в области прохождения световых филаментов, их рекомбинацию с образованием анионных экситонов, распад экситонов на френкелевские дефекты, их перезарядку, миграцию и агрегацию [4; 5]. Первым этапом в формировании центров окраски является создание электронно-дырочных пар вследствие многофотонного поглощения электронной подсистемой кристалла энергии лазерного излучения. Поэтому для разрешения полученных, казалось бы, противоречивых результатов в рамках формализма Келдыша нами был проведен расчет скорости многофотонной ионизации исходя из условий проведенных экспериментов.

Результаты теоретического моделирования показали, что внутренний фотоэффект при взаимодействии излучения фемтосекундного титан-сапфирового лазера генерирующим импульсы длительностью 50 фс, с частотой следования 10 Гц и энергией 2 мДж на длине волны 950 нм (энергия фотона  $h\nu \approx 1,4$  эВ) с кристаллами LiF ( $\Delta E_g \approx 14$  эВ) обусловлен многофотонной туннельной межзонной ионизацией. Кроме этого, при прочих

равных условиях, скорость нелинейной фотоионизации для второй гармоники фемтосекундного лазерного излучения на несколько порядков (от 2 до 4, в зависимости от интенсивности) выше, чем для длины волны 950 нм.

Полученный результат свидетельствует о более высокой плотности возбуждения при облучении кристаллов излучением на длине волны 475 нм. В этих условиях повышается выход нейтральных и отрицательно заряженных центров окраски.

*Работа поддержана научным проектом 0243-2021-0004 в рамках плана фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 г.*

### Литература

1. L.C. Courrol, R.E. Samad, L. Gomes, I.M. Ranieri, S.L. Baldochi, A.Z. de Freitas, N.D. Vieira Jr, *Opt. Express*, 12(2), 288–293 (2004).
2. T. Kurobori, K. Kawamura, M. Hirano, H. Hosono, *J. Phys. Condens. Matter*, 15, L399–L405 (2003).
3. K. Kawamura, M. Hirano, T. Kurobori, D. Takamizu, T. Kamiya, H. Hosono, *Appl. Phys. Lett.*, 84(3), 311–313 (2004).
4. Е.Ф. Мартынович, Д.С. Глазунов, А.А. Григорова, А.А. Старченко, А.В. Кирпичников, В.И. Трунов, М.А. Мерзляков, В.В. Петров, Е.В. Пестряков, *Опт. и спектр.*, 105(3), 380–384 (2008).
5. E.F. Martynovich, V.P. Dresvianskiy, A.V. Kuznetsov, A.S. Kuzakov, A.A. Popov, S.V. Alekseev, V.F. Losev, A.N. Ratakhin, S.N. Bagayev, *Laser Phys.*, 24(7), 074001 (2014).
6. В.П. Дресвянский, М.А. Моисеева, А.В. Кузнецов, Д.С. Глазунов, Б. Чадраа, О. Бухтсоож, Б. Зандан, Н. Баасанхуу, Е.Ф. Мартынович, *Изв. РАН Сер. физ.*, 80(1), 93–97 (2016).
7. В.П. Дресвянский, А.В. Кузнецов, С. Энхбат, Е.Ф. Мартынович, *Изв. РАН Сер. физ.*, 84(7), 982–986 (2020).

## ЗАПИСЬ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ МИКРОБИТОВ В ОБЪЕМЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ УЛЬТРАКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ДЛЯ ЗАДАЧ АРХИВИРОВАНИЯ

С. И. Кудряшов, И. Н. Мушкарина

*Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Россия, г. Москва,  
[i.mushkarina@lebedev.ru](mailto:i.mushkarina@lebedev.ru)*

В данной работе сообщается об оценочном исследовании кристаллов природного алмаза, LiF и CaF<sub>2</sub> в качестве оптических платформ для микромасштабного фотолюминесцентного кодирования лазерами ультракоротких импульсов для архивного оптического хранения, проверки их потенциальной емкости и жизнеспособности. Запись встроенных фотолюминесцентных микробитов в объеме природного алмаза, кристаллов LiF и CaF<sub>2</sub> осуществлялась в субфиламентационном режиме (режиме геометрической фокусировки) лазерными импульсами с длиной волны

515 нм и длительностью 0,2 пс, сфокусированными микрообъективом с числовой апертурой 0,65, как функция энергии импульса, экспозиции и межслоевого разделения.

Полученные микробиты были визуализированы с помощью 3D-сканирующей конфокальной рамановской/фотолюминесцентной микроскопии как конгломераты фотоиндуцированных квазимолекулярных цветовых центров и протестированы на предмет их отжига. Минимальное поперечное и продольное расстояние между микробитами, обеспечивающее их надежное считывание, было измерено в LiF как 1,5 и 13 микрон соответственно, что может быть улучшено в отношении емкости хранения информации за счет более сложных систем фокусировки. Эти результаты открывают путь к созданию новых оптических платформ хранения данных, использующих ультракороткую импульсную лазерную запись фотолюминесцентных микробитов в качестве носителей архивной памяти.

*Исследования поддержаны грантом Российского научного фонда (проект № 21-79-30063).*

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ИОНОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГАЛОИДНЫХ КРИСТАЛЛАХ

А. С. Мясникова, А. И. Богданов

*Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН,  
Россия, г. Иркутск, [sasham@igc.irk.ru](mailto:sasham@igc.irk.ru)*

Исследование двухвалентных редкоземельных ионов в галоидных кристаллах имеет высокую актуальность в современной науке и технологических приложениях. Одной из основных причин актуальности этой темы является потенциал, который представляют редкоземельные элементы для создания новых материалов для различных высокотехнологических отраслей. В частности, двухвалентные редкоземельные ионы в галоидных кристаллах обладают широким спектром светозлектронных свойств, что делает эти кристаллы перспективными материалами для использования в различных устройствах, таких как светодиоды, лазеры, фоточувствительные панели и др. Кроме того, исследования двухвалентных редкоземельных ионов в галоидных кристаллах способны раскрыть механизмы оптического и электронного переноса в этих материалах, что позволит более эффективно использовать их потенциал в технологических приложениях. Таким образом, исследование двухвалентных редкоземельных ионов в галоидных кристаллах необходимо для разработки новых материалов, которые могут быть использованы для улучшения эффективности и функциональности высокотехнологических устройств, а также для раскрытия базовых характеристик оптических свойств материалов.



В данной работе будут представлены результаты расчетно-теоретических исследований двухвалентных редкоземельных ионов в галоидных кристаллах (CsI, BaBrI и др.). Расчеты производились с помощью комбинации методов встроенного кластера (ORCA) и с помощью периодических (VASP). В работе будут представлены особенности применения этих программ для расчётов редкоземельных ионов, а также представлены результаты расчетов в сравнении с экспериментальными данными.

## УЯЗВИМОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТ СИСТЕМ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ

Б. А. Наседкин, Ф. Д. Киселев, В. В. Чистяков, А. О. Исмагилов,  
А. Н. Цыпкин, А. А. Гайдаш, А. В. Козубов, В. И. Егоров

*Национальный исследовательский университет ИТМО,  
Россия, г. Санкт-Петербург, [banasedkin@itmo.ru](mailto:banasedkin@itmo.ru)*

Фундаментальные законы физики гарантируют защищённое распределение квантовых ключей между легитимными пользователями. Однако такая защищённость не означает полной безопасности систем квантового распределения ключей (КРК) от действий нарушителя, направленных на извлечение информации о распределяемых ключах. Такие действия нарушителя называются атаками. В основе действий нарушителя лежит использование неидеальности характеристик оборудования используемого в системах КРК. В настоящее время были продемонстрированы эффективные атаки, которые могут быть реализованы нарушителем. Среди таких атак можно выделить атаки «Троянский конь» [1], ослепление детекторов [2] и с использованием фоторефракции в модуляторах [3], эффективность которых зависит от спектральных характеристик волоконно-оптических компонент, использованных в конкретных системах КРК. Измерение спектров пропускания волоконно-оптических компонент и оценка возможности реализации атак, является важной и актуальной задачей.

В настоящей работе представлен анализ влияния пропускания волоконно-оптических компонент на возможность реализации атак «Троянский конь» и с использованием эффекта фоторефракции в модуляторах. Для этого были измерены спектры пропускания волоконно-оптических компонент в диапазонах 400–800 нм и 1800–2100 нм. На основе полученных результатов произведены оценки ослабления интенсивности излучения при прохождении компонент, входящих в состав системы КРК на боковых частотах. На примере атаки «Троянский конь» произведена оценка границы Холево, для диапазона 1800–2100 нм.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобнауки РФ в рамках Государственного задания (Паспорт № 2019-0903).*

## Литература

1. F.Y. Lu, P. Ye, Z.H. Wang, S. Wang, Z.Q. Yin, R. Wang, X.J. Huang, W. Chen, D.Y. He, G.J. Fan-Yuan, G.C. Guo, Z.F. Han, *Optica*, 10(4), 520–527 (2023).
2. V. Chistiakov, A. Huang, V. Egorov, V. Makarov, *Opt. Express*, 27(22), 32253–32262 (2019).
3. S. Sajeed, C. Minshull, N. Jain, V. Makarov, *Sci. Rep.*, 7(1), 8403 (2017).

## СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ЛЮМИНОФОРОВ $\text{LiY}_x\text{Gd}_{1-x}\text{F}_4$ И $\text{LiGdF}_4$ : $\text{Eu}^{3+}$ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И СЕНСОРИКИ

Е. И. Олейникова, М. С. Пудовкин, О. А. Морозов, С. Л. Кораблева

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики,  
Россия, г. Казань, [kate15-05@mail.ru](mailto:kate15-05@mail.ru)

Кристалл  $\text{LiGdF}_4$  является новым сложносинтезируемым соединением, который представляет собой актуальный материал в квантовой электронике, сенсорике и фотовольтаике.

К целям и задачам данной работы можно отнести спектрально-кинетическую характеристику кристаллических частиц  $\text{LiY}_{1-x}\text{Gd}_x\text{F}_4$  ( $X = 0,05, 0,3, 0,7$  и  $1,0$ ) и  $\text{LiGdF}_4$ :  $\text{Eu}^{3+}$  (1 ат.%) в зависимости от температуры.

Впервые определен коэффициент распределения ионов  $\text{Gd}^{3+}$  в матрице  $\text{LiYF}_4$ , который равняется  $k = 0,84$ . Времена затухания люминесценции в диапазоне 100–300 К ведут себя сложным образом (рис. 1), что, по-видимому, является следствием наложения процессов многофоновной безызлучательной релаксации и пленения возбуждения. При резонансном возбуждении ионов  $\text{Gd}^{3+}$  в  $\text{LiGdF}_4$ :  $\text{Eu}^{3+}$  наблюдается интенсивный спектр люминесценции  $\text{Eu}^{3+}$  и практически не наблюдается спектр  $\text{Gd}^{3+}$ , что говорит о эффективной передаче энергии  $\text{Gd}^{3+}$  к  $\text{Eu}^{3+}$  (рис. 2).

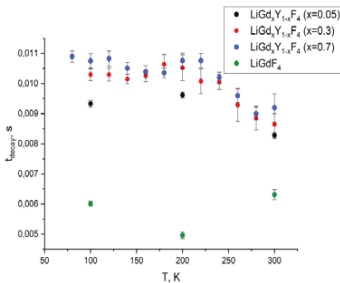


Рис. 1. Время затухания люминесценции ( $t_{\text{decay}}$ ) образцов  $\text{LiGd}_x\text{Y}_{1-x}\text{F}_4$  ( $x = 0,05; 0,3; 0,7$  и  $1,0$ ) на длине волны 312 нм ( ${}^6\text{P}_{7/2}$ - ${}^8\text{S}_{7/2}$ ) в диапазоне 100–300 К

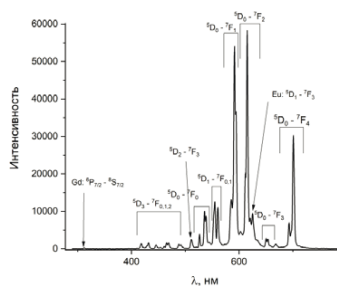


Рис. 3. Спектр люминесценции образца  $\text{LiGdF}_4$ :  $\text{Eu}^{3+}$  (1 ат.%) при комнатной температуре

Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности исследуемых материалов в квантовой электронике, сенсорике и фотовольтаике.

## КВАНТОВЫЙ ВЫХОД НОВЫХ КООРДИНАЦИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЕВРОПИЯ С $\beta$ -ДИКЕТОНАМИ И КАРБОНОВЫМИ КИСЛОТАМИ

А. В. Осадченко<sup>1,2</sup>, Д. С. Дайбаге<sup>1,2</sup>, И. А. Захарчук<sup>1,2</sup>, А. С. Селюков<sup>1,2</sup>,  
С. А. Амброзевич<sup>1,2</sup>, А. Н. Лобанов<sup>2</sup>, А. В. Рыжов<sup>2</sup>, Н. В. Певцов<sup>2</sup>,  
Д. Н. Певцов<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,  
Россия, г. Москва, [anna.vl.osadchenko@gmail.com](mailto:anna.vl.osadchenko@gmail.com)

<sup>2</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Россия, г. Москва

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт (национальный  
исследовательский университет), Россия, г. Долгопрудный

<sup>4</sup>Федеральный исследовательский центр проблем химической физики  
и медицинской химии РАН, Россия, г. Черноголовка

На сегодняшний день актуальной проблемой является поиск новых материалов для создания более эффективных и экономичных органических светоизлучающих диодов (ОСИД). В данной работе была исследована возможность использования комплексов европия (III) в качестве таких материалов.

Было проведено исследование комплексов европия (III) с  $\beta$ -дикетонами, содержащими карбоновые кислоты. Получены спектры оптического поглощения, возбуждения и фотолюминесценции. В спектрах возбуждения люминесценции наблюдается широкая полоса в области до 450 нм, отвечающая поглощению лигандов. Оптическая плотность исследованных веществ составила  $10^4$ – $10^6$  см<sup>2</sup>/моль. В области 595–615 нм наблюдается широкая полоса, которая является характерной для ионов европия (III) и соответствует магнитно-дипольному и гиперчувствительному переходу.

По интенсивности магнитно-дипольного перехода были определены квантовые выходы для каждого из исследованных комплексов. Наибольшее полученное значение квантового выхода составило 70 %.

Представленные в исследовании материалы могут быть перспективными для создания ОСИД, поскольку у данных веществ наблюдается фосфоресценция, что позволяет достичь более эффективной эмиссии света.

### Литература

1. G.L. Law, K.L. Wong, H.L. Tam, K.W. Cheah, W.T. Wong, *Inorg. Chem.*, 48(22), 10492–10494 (2009).
2. J.C.G. Bünzli, C. Piguet, *Chem. Soc. Rev.*, 34(12), 1048–1077 (2005).

## ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ОДНОМОДОВОГО И МЕЖМОДОВОГО ЧЕТЫРЁХВОЛНОВОГО СМЕШЕНИЯ В МАЛОМОДОВОМ ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ

А. Ю. Остапив<sup>1</sup>, В. П. Цыпкин<sup>1</sup>, Г. Ю. Иванов<sup>1</sup>, И. А. Ларионов<sup>1</sup>,  
В. А. Тыртышный<sup>1</sup>, А. В. Коняшкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО Научно-техническое объединение «ИРЭ-Полус»,  
Россия, г. Фрязино, [ostapiv.ayu@phystech.edu](mailto:ostapiv.ayu@phystech.edu)

<sup>2</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В. А. Котельникова РАН, Россия, г. Фрязино

При распространении интенсивного излучения по оптическому волокну имеют место различные нелинейно-оптические эффекты, в частности эффект четырёхволнового смешения (ЧВС). В отличие от случая ЧВС в одномодовом волокне (ОМЧВС) эффективное протекания ЧВС в маломодовых волокнах (ММЧВС) может быть реализовано за счёт взаимодействия различных поперечных мод [1]. В данной работе показано одновременное развитие и взаимное влияние ММЧВС (по схеме (1)) и ОМЧВС (по схеме (2)) в маломодовом оптическом волокне. Методика исследования процессов ЧВС основана на измерении спектрального и модового составов излучения при различных длинах оптического волокна для синхронизированных и несинхронизированных по времени оптических импульсов наносекундной длительности на длинах волн 1030 нм и 1562 нм. Показано, что длины волн антистоксовых компонент в процессах ОМЧВС и ММЧВС совпадают (см. рис. 1), что приводит к взаимному влиянию эффектов при синхронизации импульсов. Результаты математического моделирования указанных процессов подтверждают наличие взаимного влияния.

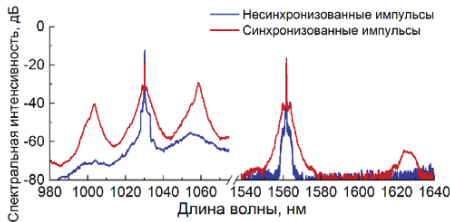


Рис. 1. Спектр излучения в случае синхронизированных (красный) и несинхронизированных (синий) оптических импульсов

$$LP_{01}^{1030} + LP_{11}^{1030} \rightarrow LP_{01}^{1003} + LP_{11}^{1059} \quad (1)$$

$$LP_{01}^{1030} + LP_{01}^{1562} \rightarrow LP_{01}^{1003} + LP_{01}^{1629} \quad (2)$$

Рис. 2. Схемы ЧВС. (1): ММЧВС; (2): ОМЧВС. Нижний индекс: номер LP моды, верхний индекс: длина волны в нм

### Литература

1. G.P. Agrawal, "Nonlinear fiber optics," in: Nonlinear Science at the Dawn of the 21st Century. Ed. by P.L. Christiansen, M.P. Sørensen, A.C. Scott. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000. pp. 195–211.

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ, ЛАЗЕРНЫЕ ГЕНЕРАЦИОННЫЕ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛА $\text{Yb,Li:ZnWO}_4$

К. А. Субботин<sup>1</sup>, А. И. Титов<sup>1</sup>, С. К. Павлов<sup>1</sup>, П. А. Волков<sup>2</sup>, Д. А. Лис<sup>1</sup>,  
F. Díaz<sup>3</sup>, U. Griebner<sup>4</sup>, П. А. Лойко<sup>5</sup>, R. M. Solé<sup>3</sup>, V. Petrov<sup>4</sup>, M. Aguiló<sup>3</sup>,  
X. Mateos<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Россия, г. Москва,  
[sergey.pavlov97@mail.ru](mailto:sergey.pavlov97@mail.ru)*

<sup>2</sup>*Институт химических реактивов и особо чистых химических  
веществ, Национальный исследовательский центр «Курчатовский  
институт», Россия, г. Москва*

<sup>3</sup>*University of Rovira i Virgili, Spain, Catalonia*

<sup>4</sup>*M. Born Institute for Nonlinear Optics and Short Pulse Spectroscopy, Germany, Berlin*

<sup>5</sup>*Research Center on Ions, Materials and Photonics, France, Caen*

Благодаря своим привлекательным оптическим и тепловым свойствам кристаллы  $\text{ZnWO}_4$ , легированные редкоземельными ионами, перспективны в качестве активных сред твердотельных лазеров. При этом крупные монокристаллы  $\text{ZnWO}_4$  могут быть выращены методом Чохрального.

В рамках работы была выращена серия монокристаллов  $\text{Yb}^{3+}, \text{Li}^+:\text{ZnWO}_4$ . Исследована зависимость паразитной окраски выращенных кристаллов от состава тигля (Pt/Rh и Pt). Измерены фактические концентрации  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Li}^+$  и рассчитаны значения коэффициентов распределения примесей. Исследована зависимость микротвердости и трещиностойкости кристаллов от концентраций  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Li}^+$ . Найдено оптимальное сочетание концентраций примесей, обеспечивающее наилучшее их вхождение в кристалл и оптимальные механические прочностные характеристики.

Методом высокотемпературной РФА получены параметры решётки и рассчитаны коэффициенты температурного расширения; изучены спектры комбинационного рассеяния; исследованы поляризованные спектры поглощения и люминесценции при 300 и 6 К, а также кинетика затухания люминесценции; двумя независимыми методами рассчитаны сечения стимулированного излучения, построены спектры усиления активной среды. Проведены эксперименты по получению лазерной генерации на кристалле  $\text{Yb}^{3+}, \text{Li}^+:\text{ZnWO}_4$  с диодной накачкой в микрочип-конфигурации. Получена эффективная непрерывная лазерная генерация с выходной мощностью 3 Вт.

*Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 23-22-00416).*

## ФОТОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЮМИНОФОРОВ НА ОСНОВЕ 3-(1,3-БЕНЗОТИАЗОЛ-2-ИЛ)-4- ГИДРОКСИБЕНЗОЛСУЛЬФОКИСЛОТЫ

Е. В. Парфёнова<sup>1</sup>, Н. В. Слюсаренко<sup>1</sup>, Е. А. Слюсарева<sup>1</sup>,  
С. В. Кулагин<sup>2</sup>, М. Л. Кукушкина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет, Россия, г. Красноярск, [katrinfly@bk.ru](mailto:katrinfly@bk.ru)  
<sup>2</sup>ООО Фирма «ОЛБО», Россия, г. Москва

Бесцветные органические люминофоры с аномальным Stokesовым сдвигом, способные давать яркое свечение в видимой области спектра, находят свое применение в качестве флуоресцентных зондов, концентраторов солнечной энергии и спектральных преобразователей.

В работе впервые методами абсорбционной, флуоресцентной стационарной и время-разрешенной спектроскопии исследовались бесцветные соединения, представленные на рисунке [1]. Были получены: квантовые выходы ( $\Phi_{fl}$ ), времена жизни ( $\tau_{fl}$ ) и анизотропия ( $r$ ) флуоресценции (рис.).

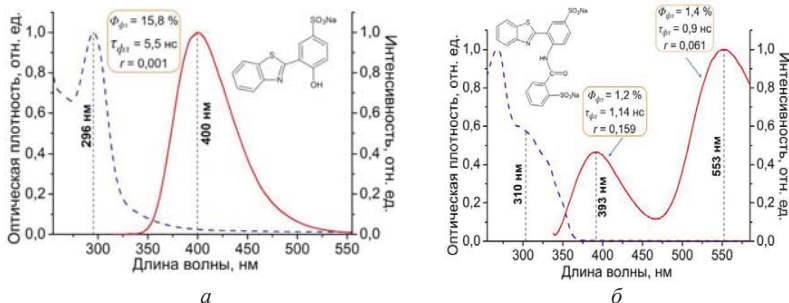


Рис. Спектры поглощения и флуоресценции натриевой соли 3-(1,3-бензотиазол-2-ил)-4-гидроксибензолсульфокислоты (а) и натриевой соли 3-(1,3-бензотиазол-2-ил)-4-[(2-сульфобензоил)амино]бензолсульфокислоты (б)

Анализ фотофизических параметров, совместно с квантово-химическими расчетами позволил показать, что аномально большой Stokesов сдвиг ( $14\ 200\ \text{см}^{-1}$ ) для натриевой соли 3-(1,3-бензотиазол-2-ил)-4-[(2-сульфобензоил)амино]бензолсульфокислоты происходит в результате реализации механизма внутримолекулярного переноса протона в возбужденном состоянии.

Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет 2030», проект «Создание новых люминесцентных материалов полифункционального назначения» и Совета по Грантам Президента РФ (проект № МК–995.2022.1.2).

### Литература

1. Е.А. Бирген, Б.М. Болотин, М.Л. Кукушкина, Е.В. Яковлева. Бесцветные, растворимые в воде органические люминофоры. Патент РФ № 2287007С1, кл. С09К11/06, С07D265/14, С07D277/66. 2006.

## ИМПУЛЬСНАЯ КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ АЛМАЗОВ, СОДЕРЖАЩИХ РАЗЛИЧНЫЕ АЗОТ-ВАКАНСИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ

Д. А. Переседова, В. С. Рипенко, А. А. Крылов, А. Г. Бураченко

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г. Томск, [npdasha.d4@mail.ru](mailto:npdasha.d4@mail.ru)  
Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, г. Томск*

Работа посвящена исследованию спектров катодолюминесценции синтетических алмазных образцов, полученных методом температурного градиента, с различными азот-вакансионными дефектами в широком диапазоне температур от 80 до 300 К. Возбуждение люминесценции в исследуемых образцах производилась под действием короткого сильноточного пучка с энергией электронов до 300 кэВ.

Приведены температурные зависимости интенсивности люминесценции бесфонных линий и максимумов фонных крыльев  $NV^-$ ,  $NV^0$  и  $N_2V^0$  центров. Также представлены расчеты спектров катодолюминесценции образца, содержащего  $NV^0$  центры и температурные зависимости компонент разложения спектров.

Данные, полученные в результате проведенного исследования, будут использоваться для создания различных оптоэлектронных устройств.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00984, <https://rscf.ru/project/22-22-00984/>.*

## СТАБИЛИЗАЦИЯ КУБИЧЕСКОЙ ФАЗЫ ФТОРИДА СВИНЦА ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ФТОРОБОРАТНЫХ СТЕКОЛ, СОЛЕГИРОВАННЫХ Nd/La, Eu/Gd И Er/Lu

О. Б. Петрова, Д. А. Бутенков, А. В. Бакаева, К. И. Рунина

*Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,  
Россия, г. Москва, [petrova.o.b@muctr.ru](mailto:petrova.o.b@muctr.ru)*

Оксофторидные свинцовые стекла являются хорошими прекурсорами для создания стеклокристаллических материалов (СКМ), которые сочетают в себе лучшие свойства кристаллических фторидов с низкофонным спектром и технологичных оксидных стекол [1]. В системах силикатных и боратных стекол кристаллизуется кубическая фаза  $\beta$ - $PbF_2$  ( $Fm\bar{3}m$ ), но часто образуется и орторомбическая фаза  $\alpha$ - $PbF_2$  ( $Pnma$ ). Стабилизация кубической фазы возможна образованием твердых растворов  $Pb_{1-x}Ln_xF_{2+x}$ , где  $Ln^{3+}$  – редкоземельный ион (РЗИ). С целью одновременного увеличения общей концентрации РЗИ в стекле и уменьшения концентрационного тушения предложено легировать исходные стекла несколькими РЗЭ с близкими ионными радиусами. Показано, что для стаби-

лизации кубической фазы в случае соактиваторов Nd/La достаточно суммарной концентрации РЗИ 3 мол.% [1], 4 мол.% достаточно для пары Eu/Gd – [2], но недостаточно для Er/Lu [3]. Стекла были синтезированы в системе  $64\text{PbF}_2\text{-}28\text{B}_2\text{O}_3\text{-}8\text{LnF}_3$ , соактивированные  $\text{ErF}_3$  и  $\text{LuF}_3$  в различных соотношениях. Контролируемой кристаллизацией получены СКМ с одной кубической кристаллической фазой, в которых наблюдалось изменение спектров люминесценции по сравнению с исходным стеклом. В отличие от СКМ, активированного только Er, в солегированном СКМ интенсивность люминесценции в области 1550 нм значительно возрастает, а апконверсионная люминесценция в видимой области незначительна. Это можно объяснить меньшей концентрацией Er в кристаллитах формирующегося твердого раствора  $\text{Pb}_{1-x-y}\text{Lu}_y\text{Er}_x\text{F}_{2+x+y}$ .

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования, Госзадание FSSM-2020-0005.*

### Литература

1. O.B. Petrova, D.A. Velichkina, M.P. Zykhova, A.V. Khomyakov, M.A. Uslamina, K.N. Nischev, A.A. Pynenkov, R.I. Avetisov, I.C. Avetissov, *J. Non-Cryst. Sol.*, 531, 119858 (2020).
2. D.A. Velichkina, K.I. Runina, M.P. Zykhova, O.B. Petrova, *Glass Ceram.*, 78(1-2), 14–17 (2021).
3. O.B. Petrova, D.A. Butenkov, A.V. Bakaeva, K.I. Runina. *Proceedings of 20<sup>th</sup> International Conference «Laser Optics» ICLO-2022* (St. Petersburg, 2022). P. 355.

## ИЗМЕРЕНИЕ КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ОТ КУБИЧЕСКОГО ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ЭНЕРГИЕЙ 5,7 МэВ

Д. А. Поломошнова, Т. Д. Сабаев, А. В. Вуколов, В. Д. Пайгин,  
Д. А. Шкитов

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, [dap63@tpu.ru](mailto:dap63@tpu.ru)*

Для нормальной эксплуатации любого ускорителя заряженных частиц необходимы контроль и диагностика пучка. На микротроне ТПУ [1] возникла необходимость замены ранее используемых люминофорных экранов, применяемых на выведенном электронном пучке. В связи с этим, было принято решение самостоятельно изготовить люминофорный экран (ЛЭ). В рамках работы по изготовлению ЛЭ, не только для выведенного электронного пучка, но и в вакуумной камере одной из экспериментальных станций, были проведены предварительные измерения по изучению свойств катодолюминесценции образца прозрачной керамики из диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия (YSZ), полученного методом электроимпульсного плазменного спекания.



Образец (толщина 1,531 мм, диаметр 14,27 мм) был установлен на пути выведенного электронного пучка на расстоянии 2 см от патрубку под углом  $45^\circ$ . Сперва, для визуального фиксирования свечения использовалась видеочамера Logitech C270 HD Webcam, установленная на расстоянии 44 см. Далее полученные изображения подвергались контрастной обработке. Затем были проведены измерения времени высвечивания с помощью кремниевого ФЭУ MicroFJ-SMA-60020 (с фильтром HC-11). Значение тока пучка в измерениях были  $\sim 0,3$  мкА с длительностью макроимпульса  $\sim 0,5$  мкс и частотой сбросов 50 Гц, энергия электронов была 5,7 МэВ.

В результате установлено, что зафиксировать катодоллюминесценцию YSZ-керамики при облучении электронным пучком 5,7 МэВ возможно с помощью стандартной веб-камеры. Наблюдалось полное свечение всей поверхности люминесцентной керамики. Время высвечивания исследуемого образца составило около 2 мкс при указанных значениях тока и длительности пучка. Отметим, что визуально было замечено потемнение образца, обусловленное наведенными дефектами, после облучения в течение  $\sim 30$  мин, которое держалось около двух недель после проведения эксперимента, позже образец частично восстановил свою прозрачность.

Прозрачная керамика была получена на оборудовании в Центре коллективного пользования НОИЦ «Наноматериалы и нанотехнологии» Томского политехнического университета.

### Литература

1. Д.А. Поломошнова, Д.А. Шкитов, Сборник тезисов докладов XI Международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине» (Томск, 2022). С. 130.

## СПЕКТРЫ КРАЕВОЙ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ БЕСПРИМЕСНОГО АЛМАЗА В РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ДИАПАЗОНАХ

А. С. Попова<sup>1</sup>, Е. И. Липатов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, г. Томск

<sup>2</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН,  
Россия, г. Томск, [popova\\_31\\_03@mail.ru](mailto:popova_31_03@mail.ru)

Исследование люминесценции является одним из спектральных методов анализа, позволяющих изучать свойства электронных возбуждений в алмазе, таких как электронно-дырочная плазма (ЭДП), экситоны Ванье-Мотта и Френкеля, биэкситоны, экситонные комплексы (ЭК) и электронно-дырочная жидкость (ЭДЖ). Ввиду высокой энергии связи свободного экситона (СЭ) их формирование энергетически выгодно при комнатной и

повышенных температурах. В области низких температур при охлаждении жидким азотом по мере нарастания интенсивности возбуждения наблюдается формирование экситонных молекул, экситонных комплексов и далее конденсация СЭ в капли ЭДЖ [1].

Алмаз отличается от других полупроводниковых материалов высоким удельным сопротивлением и напряжением пробоя, большой шириной запрещенной зоны, а также высокой биполярной подвижностью носителей зарядов, что позволяет наблюдать ЭДЖ в спектрах ФЛ алмаза при более высоких температурах. Так, например, в экспериментах с Si ЭДЖ наблюдалась при  $T = 24,5$  К, в Ge при  $T = 6,7$  К, а в алмазе при  $150 < T < 200$  К.

При приложении внешнего электрического поля, формирование ЭДЖ в кристалле приводит к усилению фототока. Данный эффект может найти применение в углеродной электронике и в оптических коммутаторах больших мощностей, характеризующихся меньшей временной нестабильностью срабатывания по сравнению с электрическими разрядниками (меньшим джиттером).

В данной работе исследованы спектры фотолюминесценции беспримесного алмаза при возбуждении импульсным лазерным излучением с длиной волны  $\lambda = 222$  нм и плотностью возбуждения от  $2,6$  МВт/см<sup>2</sup> до  $15,7$  МВт/см<sup>2</sup>. Выявлены температурные границы конденсации СЭ в капли ЭДЖ: от  $152$  К при плотности возбуждения  $6,9$  МВт/см<sup>2</sup> до  $197$  К при плотности возбуждения  $15,7$  МВт/см<sup>2</sup>, что позволяет наблюдать появление ЭДЖ без декомпозиции спектров ФЛ на фоновые компоненты рекомбинации СЭ и ЭДЖ.

*Исследование было выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2020-0048.*

#### **Литература**

1. Л.В. Келдыш, П. Вашишта, Р.К. Калиа и др. Электронно-дырочные капли в полупроводниках. М.: Наука, 1988. 468 с.

## ГЕНЕРАЦИЯ ЗАПУТАННЫХ ФОТОНОВ АНСАМБЛЕМ ДИНАМИЧЕСКИ МОДУЛИРОВАННЫХ КВАНТОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В ВОЛНОВОДЕ

А. В. Пошакинский<sup>1</sup>, Д. И. Ильин<sup>2</sup>, А. Н. Поддубный<sup>1</sup>, И. В. Иорш<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН,  
Россия, г. Санкт-Петербург, [poshakinskiy@mail.ioffe.ru](mailto:poshakinskiy@mail.ioffe.ru)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет ИТМО,  
Россия, г. Санкт-Петербург

В настоящее время происходит активное развитие квантовой электродинамики в волноводах – нового раздела квантовой оптики, изучающего взаимодействие фотонов, распространяющихся по одномерному оптическому волноводу, с расположенными вблизи него квантовыми излучателями (двухуровневыми системами) [1]. В данной работе описаны оптические свойства структуры с двумя квантовыми излучателями, резонансные частоты которых модулируются во времени по гармоническому закону (рис., *a*).

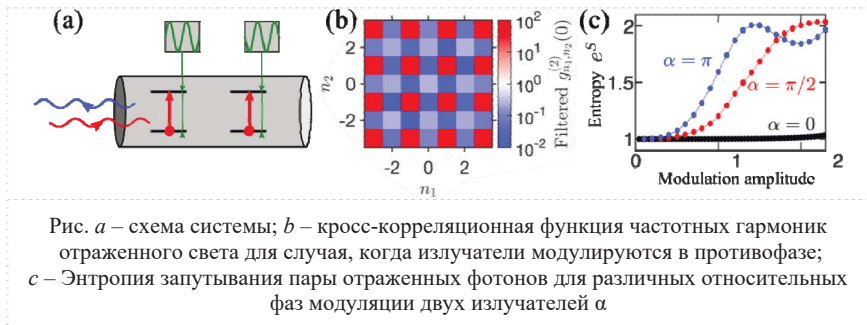


Рис. *a* – схема системы; *b* – кросс-корреляционная функция частотных гармоник отраженного света для случая, когда излучатели модулируются в противофазе; *c* – Энтропия запутывания пары отраженных фотонов для различных относительных фаз модуляции двух излучателей  $\alpha$

Если система возбуждается светом на частоте  $\omega$ , то отраженный свет содержит гребенку частот  $\omega + n\Omega$ , где  $n$  – целое число. На рис., *b* показана цветом кросс-корреляционная функция  $g^{(2)}$  гармоник с номерами  $n_1$  и  $n_2$ . Группировка или антигруппировка фотонов наблюдается в зависимости от четности номеров их гармоник. Отраженные системой фотоны находятся в суперпозиции состояний с различными номерами гармоник, поэтому их можно рассматривать как многоуровневые кудиты. Отражение одиночного фотона соответствует произведению над кудитом определенной унитарной операции. Если от системы отражаются несколько фотонов одновременно, то они оказываются запутанными. Энтропия запутывания  $S$  показана на рис., *c*. При определенной амплитуде модуляции энтропия достигает  $\ln 2$ , что соответствует тому, что отраженные фотоны находятся в белловском состоянии.

*Работа поддержана грантом РФФ 21-72-10035.*

## Литература

1. A.S. Sheremet, M.I. Petrov, I.V. Iorsh, A.V. Poshakinskiy, A.N. Poddubny, *Rev. Mod. Phys.*, 95, 015002 (2023).
2. D. Ilin, A.V. Poshakinskiy, A.N. Poddubny, I. Iorsh, *Phys. Rev. Lett.*, 130, 023601 (2023).

## КОНТРАСТ И ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ШУМ ДЛЯ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Е. А. Протасова<sup>1</sup>, А. Л. Ракевич<sup>1</sup>, А. С. Липатьев<sup>2</sup>, Г. Ю. Шахгильдян<sup>2</sup>,  
В. Н. Сигаев<sup>2</sup>, Е. Ф. Мартынович<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН,  
Россия, г. Иркутск, [eparot@yandex.ru](mailto:eparot@yandex.ru)*

<sup>2</sup>*Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,  
Россия, г. Москва*

Целью работы являлось сравнение значений контраста и отношения сигнал/шум для фотографических материалов с люминесцентной визуализацией изображения на основе цинкфосфатного стекла  $92(40\text{P}_2\text{O}_5-60\text{ZnO})-8\text{Ag}_2\text{O}$ , кристаллов фторида лития и хлорида калия с примесью азотокислого таллия [1–3]. В данных материалах изображения формируются центрами люминесценции, образуемыми при экспозиции ионизирующим излучением. В качестве такого ионизирующего излучения может быть использовано интенсивное лазерное излучение, вакуумный ультрафиолет или рентгеновское излучение. Для создания центров люминесценции в этой работе все образцы были облучены одной и той же дозой рентгеновского излучения. Для получения информации о величине контраста изучаемых материалов и отношений сигнал/шум исследовалась интенсивность люминесценции до и после экспозиции. Исследования проведены с помощью конфокального сканирующего люминесцентного микроскопа с временным разрешением MicroTime 200, работающего в режиме время-коррелированного счета фотонов. Люминесценция возбуждалась излучением пикосекундных лазеров с длинами волн 375, 405 и 470 нм. Полученные результаты представлены в таблице.

Материал	Длина волны визуализации, нм	Контраст	Соотношение сигнал/шум
Стекло	375	25 300	6,8
LiF	470	1470	50
KCl – TiNO <sub>3</sub>	405	30 084	1881

Результаты эксперимента показали, что стекло и KCl – TiNO<sub>3</sub> обладают сравнимыми значениями контраста, однако соотношение сигнал/шум лучше у материала на основе хлорида калия.

*Работа поддержана научным проектом 0243-2021-0004 в рамках плана фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 г.*

## Литература

1. Е.Ф. Мартынович. Нелинейный фотографический люминесцентный материал. Патент РФ № 2758567С1, кл. G03С1/725. 2021.
2. Е.А. Протасова, А.Л. Ракевич, Е.Ф. Мартынович, *Изв. РАН Сер. физ.*, 86(10), 1424–1428 (2022).
3. G.Y. Shakhgildyan, A.S. Lipatiev, M.P. Vetchinnikov, V.V. Popova, S.V. Lotarev, N.V. Golubev, E.S. Ignat'eva, M.M. Presniakov, V.N. Sigaev, *J. Non-Cryst. Solids*, 481, 634–642 (2018).

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДИОКСИДА АЗОТА С ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ 222 нм

А. В. Пучикин<sup>1</sup>, Ю. Н. Панченко<sup>1,2</sup>, И. Н. Коновалов<sup>1</sup>,  
М. В. Андреев<sup>2</sup>, В. Е. Прокопьев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт сильноточной электроники СО РАН,  
Россия, г. Томск, [apuchikin@mail.ru](mailto:apuchikin@mail.ru)*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г. Томск*

Диоксид азота является токсичным веществом, который содержится в атмосфере промышленных городов. Для определения источника локализации NO<sub>2</sub> наиболее эффективно используются системы лазерной локализации, которые позволяют дистанционно и оперативно обнаруживать выбросы опасных веществ в воздухе. Одним из перспективных методов дистанционной оптической диагностики является фотофрагментация сложной молекулы NO<sub>2</sub> с последующей лазерно-индуцированной флуоресценцией колебательно-возбужденных фрагментов NO X<sup>2</sup>Π, v" > 0 (ФФ-ЛИФ). Оптимальный выбор лазерного излучения из свойств поглощения NO<sub>2</sub> позволяет эффективно осуществлять процесс фотофрагментации основной молекулы с последующей ЛИФ ее фрагментов за время импульса воздействия [1].

В данной работе сообщается о результатах исследования взаимодействия УФ-С лазерного излучения 222 нм с NO<sub>2</sub> в атмосферной среде. Показаны кинетические каналы фотофрагментации и влияние эффекта тушения атмосферными газами азота и кислорода на спектральные характеристики флуоресценции оксида азота.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № FWRM-2021-0014.*

## Литература

1. Y.N. Panchenko, A.V. Puchikin, S.A. Yampolskaya, S.M. Bobrovnikov, E.V. Gorlov, V.I. Zharkov, *IEEE J. Quantum Electron.*, 57(2), 1–5 (2021).

## РАДИАЦИОННЫЕ ЦЕНТРЫ В КРИСТАЛЛАХ $\text{CaSrBaF}_6$

Е. А. Раджабов<sup>1</sup>, В. А. Козловский<sup>1</sup>, В. Панкратов<sup>2</sup>,  
Р. Ю. Шендрик<sup>1</sup>, А. С. Мясникова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН,  
Россия, г. Иркутск, [eradzh@igc.irk.ru](mailto:eradzh@igc.irk.ru)

<sup>2</sup>Институт физики твердого тела, Латвийский университет, Латвия, г. Рига

Использование твердых растворов фторидов Ca, Sr, Ba потенциально позволит менять их оптические свойства в широких пределах [1]. Относительно недавно были выращены кристаллы  $\text{CaSrBaF}_6$ ,  $\text{CaSrBaF}_6\text{-Tm}$  и проводилось исследование их свойств [1; 2].

В настоящей работе исследовались кристаллы  $\text{CaSrBaF}_6$ , выращенные методом Стокбаргера в графитовом тигле в вакууме. Кристаллы  $\text{CaSrBaF}_6$ , в отличие от бинарных кристаллов щелочно-земельных фторидов, легко окрашиваются рентгеновским излучением при комнатной температуре. В результате облучения появляются как минимум три полосы около 270 нм – при 230, 270 и 340 нм. При температуре 77 К кристаллы не окрашиваются.

При возбуждении в интервале длин волн 200–400 нм в облученных кристаллах наблюдается свечение в области 500–1400 нм. Максимумы полос свечения находятся при 600, 750, 1000 нм. Свечение возбуждается преимущественно в полосе 270 нм. В затухании свечения с максимумом в области 600 нм в  $\text{CaSrBaF}_6$  наблюдаются компоненты с временами затухания около 60 нс и 4,1 мкс при 80 К и 0,15 и 0,36 мс при 295 К. Поглощение (и свечение)  $\text{CaSrBaF}_6$  наведенное рентгеновским облучением термически разрушается в интервале температур 130–250°С.

В спектре возбуждения в области вакуумного ультрафиолета наблюдались полосы при 270, 220, 166, 148 и 122 нм. Полоса при 122 нм находится в области возбуждения экситонов в щелочно-земельных фторидах и, по-видимому, обусловлена созданием экситонов около радиационных центров.

Непрерывный и значительный рост полос поглощения с дозой рентгеновского облучения беспримесных кристаллов  $\text{CaSrBaF}_6$  указывает на то, что наведенные центры относятся к собственным дефектам. Полоса свечения около 1000 нм, близка по положению к полосе F-центров в  $\text{CaF}_2$ . В противоположность F-центрам их поглощение сдвинуто в ультрафиолет (270 нм против 360 нм для F центров в  $\text{CaF}_2$ , что также подтверждается нашими неэмпирическими расчетами).

### Литература

1. G.A. Komandin, I.E. Spector, P.P. Fedorov, S.V. Kuznetsov, S.N. Ushakov, M.A. Uslamina, K.N. Nishchev, E.A. Garibin, *Opt. Mater.*, 127, 112267 (2022).
2. С.Н. Ушаков, М.А. Усламина А.А. Пыненков, В.П. Мишкин, К.Н. Нищев, С.В. Кузнецов, Е.В. Чернова, П.П. Федоров, *Конденсированные среды и межфазные границы*, 23(1), 101–107 (2021).

## КРАЕВАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ МАЛОПРИМЕСНЫХ АЛМАЗОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЬНОТОЧНЫХ И МИКРОТРОННЫХ ПУЧКОВ

В. С. Рипенко<sup>1,2</sup>, А. Г. Бураченко<sup>1,2</sup>, Д. А. Переседова<sup>1,2</sup>, А. А. Крылов<sup>1,2</sup>,  
К. П. Артемов<sup>2</sup>, А. В. Вуколов<sup>3</sup>, Е. И. Липатов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г. Томск, [dsws@vripenko.ru](mailto:dsws@vripenko.ru)

<sup>2</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, г. Томск

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск

В работе представлены результаты исследования спектров краевой катодолюминесценции малопримесных алмазных образцов ( $N < 10$  мд), полученных как методом температурного градиента, так и газохимического осаждения, в широком интервале температур от 90 до 800 К. Для возбуждения катодолюминесценции использовался короткий сильноточный пучок с энергией электронов до  $\sim 300$  кэВ, а также микротронный пучок.

Приведены температурные зависимости спектров экситонной люминесценции. Проведено сравнение спектров катодолюминесценции, получаемых от сильноточного пучка и микротрона. Обнаружено, что при воздействии микротронного пучка, с энергией электронов до 6 МэВ, на малопримесные алмазные образцы возбуждения краевой люминесценции не происходит, однако наблюдается свечение центров окраски в видимой области спектра и излучение Вавилова-Черенкова.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00984, <https://rscf.ru/project/22-22-00984/>.

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФУРИМАЗИНА В ЦЕЛЕНТЕРАЗИН-СВЯЗЫВАЮЩЕМ БЕЛКЕ

А. В. Рогова<sup>1</sup>, С. В. Зангеева<sup>1</sup>, А. Н. Кудрявцев<sup>2</sup>, В. В. Красицкая<sup>2</sup>,  
Л. А. Франк<sup>2</sup>, Ф. Н. Томили<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет, Россия, г. Красноярск,  
[arogova1927@gmail.com](mailto:arogova1927@gmail.com)

<sup>2</sup>Институт биофизики СО РАН – обособленное подразделение  
ФИЦ КНЦ СО РАН, Россия, г. Красноярск

<sup>3</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН – обособленное подразделение  
ФИЦ КНЦ СО РАН, Россия, г. Красноярск, [felixnt@gmail.com](mailto:felixnt@gmail.com)

$\text{Ca}^{2+}$ -инициируемый целентеразин-связывающий белок (СВР) является одним из трёх ключевых белков биолюминесцентной системы коралла *Renilla*. СВР представляет собой стабильный комплекс целентеразина (СТЗ) и одноцепочечного полипептида с молекулярной массой около 20 кДа. *NanoLuc* — это искусственная СТЗ-зависимая люцифераза, со-

зданная из малой субъединицы люциферазы креветки *Oplophorus gracilirostris*. Она стала очень популярным репортером благодаря яркой и длительной биолюминесценции, небольшому размеру (19 кДа), широкому диапазону нечувствительности к рН и повышенной стабильности [1]. В поисках аналогичной формы субстрата для люциферазы, был синтезирован фуримазин (FMZ) и соответствующий фуримазин-зависимый комплекс. Проведено теоретическое исследование структур двух субстратов, конформационные изменения СВП-белка при замене СТЗ на FMZ.

Квантовохимические расчёты проводились методом функционала плотности с помощью ВЗЛР функционала в базе ss-pVDZ. Проведена оптимизация геометрии различных конформаций FMZ в газовой фазе в различных растворителях, рассчитаны спектры поглощения с помощью TD-DFT метода в рамках сольватационной модели (SMD). Молекула FMZ была помещена в активный центр ароСВП, структуры были оптимизированы с помощью метода квантовохимических фрагментов (FMO) [2]. Спектры поглощения для FMZ в полости белка были рассчитаны методом FMO1-TD-VЗЛР/6-31G\*/PCM. Рассчитанный максимум в спектре поглощения FMZ в полости белка составляет 437 нм; что хорошо согласуется с экспериментальным. Проведён подсистемный анализ, включающий межфрагментные взаимодействия лиганда и аминокислот с использованием теории возмущений Мёллера-Плессета второго порядка RI-MP2/6-31G(d). Этот анализ был проведен для комплексов СТЗ-ароСВП и FMZ-ароСВП, для оценки энергии связывания субстратов с белком. Все расчёты выполнены в программе GAMESS.

Таким образом, комплекс фуримазина с СВП белком является перспективным субстратом, особенно для применения в анализах *in vitro*.

### Литература

1. E.P. Coutant, G. Gagnot, V. Hervin, R. Baatallah, S. Goyard, Y. Jacob, T. Rose, Y.L. Janin, *Chem. Eur. J.*, 26(4), 948–958 (2020).
2. D.G. Fedorov, *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Mol. Sci.*, 7(6), e1322 (2017).



## УПРАВЛЕНИЕ ДОБРОТНОСТЬЮ МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОПТИЧЕСКОГО МИКРОРЕЗОНАТОРА

Г. А. Романенко<sup>1,2,3</sup>, П. С. Панкин<sup>2,4</sup>, Д. С. Бузин<sup>2,4</sup>, Д. Н. Максимов<sup>2,4</sup>,  
В. С. Сутормин<sup>2,4</sup>, А. И. Краснов<sup>2,4</sup>, Ф. В. Зеленев<sup>3,5</sup>, А. Н. Масюгин<sup>3,5</sup>,  
С. В. Неделин<sup>4,6</sup>, Н. А. Золотовский<sup>4,6</sup>, И. А. Тамбасов<sup>2,4,6</sup>, М. Н. Волочаев<sup>2</sup>,  
И. В. Тимофеев<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>Красноярский научный центр СО РАН, Россия, г. Красноярск, [fic@ksc.krasn.ru](mailto:fic@ksc.krasn.ru)

<sup>2</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН – обособленное подразделение  
ФИЦ КНЦ СО РАН, Россия, г. Красноярск, [dir@iph.krasn.ru](mailto:dir@iph.krasn.ru)

<sup>3</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий  
им. академика М. Ф. Решетнева, Россия, г. Красноярск, [info@sibsau.ru](mailto:info@sibsau.ru)

<sup>4</sup>Сибирский федеральный университет, Россия, г. Красноярск, [office@sfu-kras.ru](mailto:office@sfu-kras.ru)

<sup>5</sup>АО Научно-производственное предприятие «Радиосвязь»,  
Россия, г. Красноярск, [albert.masvugin@mail.ru](mailto:albert.masvugin@mail.ru)

<sup>6</sup>ООО Научно-производственная компания «Спецтехнаука»,  
Россия, г. Красноярск, [develop@npk-stn.ru](mailto:develop@npk-stn.ru)

Связанное состояние в континууме (ССК) – это безызлучательное, бесконечно добротное состояние открытой системы [1; 2]. ССК реализуется, когда локализованная внутри резонатора мода не связана с излучающими волнами, распространяющимися в волноводах. Спектрально ССК проявляется в виде коллапса ширины резонансных линий.

Предложена трехканальная модель слоистого металл-диэлектрического оптического микрорезонатора с жидким кристаллом в качестве резонаторного слоя. В спектрах пропускания микрорезонатора наблюдаются многочисленные резонансные линии.

Экспериментально продемонстрирована трансформация спектров пропускания микрорезонатора с помощью трех методов: механического вращения образца, его нагрева и приложения внешнего напряжения. В каждом случае показано управление добротностью резонансов, за счет изменения скорости радиационных потерь, путем изменения оптических характеристик слоя жидкого кристалла.

### Литература

1. A.F. Sadreev, *Rep. Prog. Phys.*, 84(5), 055901 (2021).
2. К.Л. Кошелев, З.Ф. Садриева, А.А. Щербаков, Ю.С. Кившарь, А.А. Богданов, *УФН*, 193(5), 528–553 (2023).

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ГИБРИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ $\text{CaF}_2$ И 8-ОКСИХИНОЛЯТА ЛИТИЯ В УСЛОВИЯХ ТРОПИЧЕСКОГО КЛИМАТА

К. И. Рунина<sup>1</sup>, Л. В. Попкова<sup>1</sup>, Р. И. Аветисов<sup>1</sup>, О. Б. Петрова<sup>1</sup>,  
До Динь Чунг<sup>2</sup>, Та Тху Чанг<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,  
Россия, г. Москва, [runinakristina@mail.ru](mailto:runinakristina@mail.ru)*

<sup>2</sup>*Институт тропического материаловедения,  
Российско-вьетнамский тропический научно-исследовательский  
и технологический центр, Вьетнам, г. Ханой*

Гибридные материалы (ГМ) – материалы, образованные за счет сочетания различных компонентов (неорганических и органических), связанных между собой на молекулярном уровне. Одним из возможных применений люминесцентных пленок на основе гибридных материалов является маркировка товаров и ценностей (например, культурных ценностей) для обеспечения защиты от подделки. С целью исследования устойчивости пленок ГМ к неблагоприятным факторам окружающей среды был выбран ГМ, полученный твердофазным синтезом на основе  $\text{CaF}_2$  и 8-оксихинолята лития (Liq) [1]. Полученную суспензию ГМ и изопропилового спирта заливали в капиллярный фломастер. Пленки были нанесены на поверхности с различной шероховатостью и химической природой. С целью защиты от механического повреждения пленки были покрыты тонким слоем цианоакрилатного клея [2]. Образцы пленок были экспонированы во Вьетнамско-Российском тропическом центре с марта 2021 г. по февраль 2023 г. на двух полигонах в Ханое и Нячанге. Был проведен сравнительный анализ спектральных характеристик образцов, полученных за разные временные отрезки: через год, полтора и два года.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования, Госзадание FSSM-2020-0005.*

*Авторы выражают благодарность проекту «Тропическое материаловедение: Защита технологий и материалов от внешних воздействий тропического климата» (Эколан Т-1.7) за возможность исследования стабильности пленок в условиях тропического климата во Вьетнамско-Российском тропическом центре.*

### Литература

1. К.И. Рунина, А.Ю. Секачева, О.Б. Петрова, *Успехи в химии и химической технологии*, 34(4 (227)), 80–82 (2020).
2. К.И. Рунина, Р.И. Аветисов, О.Б. Петрова, Д.Ч. До, Т.Ч. Та, *Стекло и керамика*, 96(1), 33–40 (2023).

## ПРЯМАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ В ОБЪЕМЕ ПРОЗРАЧНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

А. Е. Рупасов<sup>1</sup>, С. И. Кудряшов<sup>1</sup>, А. В. Богацкая<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН,

Россия, г. Москва, [rupasovan@lebedev.ru](mailto:rupasovan@lebedev.ru)

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,

Россия, г. Москва

Фемтосекундная лазерная запись двулучепреломляющих субволновых нанорешеток в объеме диэлектриков изучается уже почти два десятилетия [1; 2], обещающая множество интересных приложений в области поляризационной макрооптики [3; 4]. Образование субволновых нанорешеток в плоскости, перпендикулярной оптической оси лазерного излучения, долгое время оставалось необъяснимым, и только в последние годы стали рассматривать процессы взаимодействия падающих ультракоротких лазерных импульсов с широкозонными прозрачными диэлектриками.

В данной работе проведены эксперименты по записи двулучепреломляющих микроструктур под действием сфокусированных ультракоротких лазерных импульсов с несколькими фиксированными уровнями энергии импульса на фиксированной глубине в объеме плавленного кварца [5]. Фазовый сдвиг измерен для различных условий записи микроструктур, и в результате этого анализа предложен механизм, объясняющий образование нанорешеток, ответственных за двулучепреломление, их расположение и ориентацию относительно оптической оси лазерного излучения, а также характер зависимости фазового сдвига от энергии/интенсивности лазерных импульсов.

*Исследование финансируется за счет гранта Российского научного фонда (№ 22-72-10076).*

### Литература

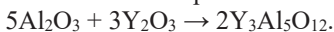
1. Y. Shimotsuma, P.G. Kazansky, J. Qiu, K. Hirao, *Phys. Rev. Lett.*, 91(24), 247405 (2003).
2. C. Hnatovsky, R.S. Taylor, P.P. Rajeev, E. Simova, V.R. Bhardwaj, D.M. Rayner, P.B. Corkum, *Appl. Phys. Lett.*, 87, 014104 (2005).
3. R. Drevinskas, P.G. Kazansky, *APL Photonics*, 2(6), 066104 (2017).
4. M. Sakakura, Y. Lei, L. Wang, Y.H. Yu, P.G. Kazansky, *Light Sci. Appl.*, 9(1), 15 (2020).
5. W. Hayes, A.M. Stoneham. *Defects and defect processes in nonmetallic solids*. New York: Dover Publications, 2004. 480 p.

## СИНТЕЗ YAG:Ce КЕРАМИКИ В ПОЛЕ РАДИАЦИИ

И. А. Сайдазимов, Б. П. Гриценко

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, [august667@mail.ru](mailto:august667@mail.ru)*

При изготовлении светодиодов широко применяются люминофоры на основе оксидов металлов. Существующие технологии синтеза таких люминофоров имеют два основных недостатка: большое время синтеза (от 20 до 60 часов) и необходимость использования, в процессе синтеза, дополнительных трудно выводимых веществ. Ведется разработка новой технологии синтеза люминесцентной керамики в поле мощного потока высокоэнергетических электронов [1], которая лишена этих недостатков. Для синтеза используется ускоритель ЭЛВ-6 ИЯФ СО РАН со следующими параметрами: энергия электронов  $E = 1,4 - 2,5$  МэВ и плотностью мощности до  $P = 50$  кВт/см<sup>2</sup>. Для синтеза готовилась шихта со стехиометрическим составом изготавливаемой керамики:



Смесь активировалась добавлением 0,5 % Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, который обеспечивает эффективное свечение при возбуждении материала в области 450 нм. Шихта загружалась в тигель и подвергалась воздействию мощного потока электронов в течение 10 с. В процессе воздействия потока электронов в тигле формировался образец, типичный вид которого приведен на рисунке.



Рис. Синтезированный образец

*Исследования показали, что качественные и количественные характеристики люминесценции синтезированных образцов подобны известным для ИАГ:Ce люминофоров. Яркость возбуждаемой люминесценции равномерна по всей площади образца. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-73-00108, <https://rscf.ru/project/23-73-00108/>.*

### Литература

1. V.M. Lisitsyn, A.T. Tulegenova, E.V. Kaneva, D.A. Musakhanov, B.P. Gritsenko, *Materials*, 16(3), 1057 (2023).

## ТРЕМОДЕПОЛЯРИЗАЦИЯ ФТОРИДОВ ЛЕГИРОВАННЫХ ПРИМЕСЯМИ ТРЁХВАЛЕНТНЫХ ЛАНТАНОИДОВ

А. В. Самборский<sup>1</sup>, Е. А. Раджабов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет,  
Россия, г. Иркутск, [arss-inc@hotmail.com](mailto:arss-inc@hotmail.com)

<sup>2</sup>Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН,  
Россия, г. Иркутск

Изучен процесс переориентации диполей гетерогенных лантаноидов в кристаллах SrF<sub>2</sub>, BaF<sub>2</sub>, CaF<sub>2</sub> с двойной активацией лантаноидов одной группы (Eu, Sm, Yb) и лантаноидов другой группы (Nd, Sm, Ho, Tm, Yb). Примеси лантаноидов первой и второй групп вводили в равных концентрациях 0,01, 0,03, 0,1, 0,45 моль. %. Кристаллы выращивали в вакууме в графитовом тигле по методу Стокбаргера [1].

Измерения проводились в криостате в вакууме при линейной скорости нагрева от 12 град/мин. Сначала образец поляризовали при комнатной температуре 2 кВ в течение 3 мин, а затем охлаждали до 85 К. После этого образец нагревали, снимая показания возникающего в образце тока.

У всех исследованных образцов наблюдалось изменение пиков спектров термодеполяризации, в сравнении с образцами, активированными одной из примесей.

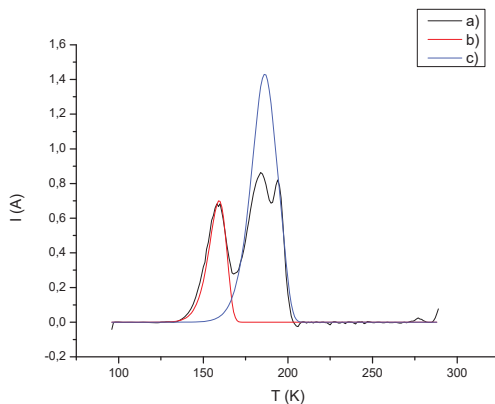


Рис. Экспериментальный спектр термодеполяризации а) BaF<sub>2</sub> – 0,1 % YbF<sub>3</sub> – 0,1 % TbF<sub>3</sub>; б) Расчетный график для Yb<sup>3+</sup>-F<sub>i</sub><sup>-</sup>; в) Расчетный график для Tb<sup>3+</sup>-F<sub>i</sub><sup>-</sup>

Для образцов BaF<sub>2</sub> активированных Yb<sup>3+</sup> и Tb<sup>3+</sup> (рис.) наблюдалось два пика при температурах 162 К и 185 К, обусловленные переориентацией диполей Yb<sup>3+</sup>-F<sub>i</sub><sup>-</sup> с энергией активации 0,46 эВ и Tb<sup>3+</sup>-F<sub>i</sub><sup>-</sup> с E<sub>a</sub> = 0,49 эВ соответственно. Для образцов BaF<sub>2</sub>-0,1%EuF<sub>3</sub>-0,1%YbF<sub>3</sub> наблюдалось уширение пика при температурах 176 К со слабо выраженным пиком при температуре 185 К, обусловленные переориентацией диполей Yb<sup>3+</sup>-F<sub>i</sub><sup>-</sup> с

$E_a = 0,46$  эВ и  $\text{Eu}^{3+}\text{-F}_i^-$  с  $E_a = 0,48$  эВ соответственно. Переориентация диполей  $\text{Ln}^{3+}\text{-F}_i^-$  происходит в интервале 160–200 К для диполей, в которых межузельный фтор находится в положении (NNN, симметрия  $C_{3v}$ ) в  $\text{BaF}_2$  [2]. Для диполей  $\text{Ln}^{3+}\text{-F}_i^-$  (NNN) температура пиков растет с увеличением радиуса лантаноида.

#### Литература

1. П.П. Феофилов, *Опн. и спект.*, 12(4), 531–533 (1962).
2. E. Radzhabov, *Phys. Status Solidi B*, 257(8), 1900465 (2020).

## ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ СЛОЖНЫХ НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ТИТАНА ДЛЯ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ ВОДОРОДА И ПЕРЕРАБОТКИ БИОСЫРЬЯ

В. А. Светличный, О. А. Реутова, Е. Д. Фахрутдинова,  
Т. С. Харламова, О. В. Водянкина

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г. Томск, [v\\_svetlichnyi@bk.ru](mailto:v_svetlichnyi@bk.ru)*

Лазерные методы синтеза наноразмерных и наноструктурированных материалов, наномодификации поверхности и других воздействий в нанометровом диапазоне интенсивно развиваются в последнее время. Благодаря бесконтактности, отсутствию дополнительных химических агентов и экстремальным высокоэнергетическим условиям воздействия, возможно получение высокочистых материалов с уникальными физико-химическими свойствами, востребованными для самого широкого круга применений. Такие материалы востребованы в биомедицине, оптоэлектронике, сенсорике, гетерогенном катализе. Одно из современных направлений, где нашли применение наноматериалы лазерного синтеза, связано с возобновляемой энергетикой [1] как с получением, так с хранением и анализом [2]. Другое важное направление их применения – катализаторы для переработки возобновляемого сырья.

Недавно мы показали, что лазерными методами можно получать высокодефектный «темный» диоксид титана и композиты Pt-TiO<sub>2</sub> на его основе для эффективной фотокаталитической генерации водорода [3]. Также мы продемонстрировали возможность создания лазерными методами сложных биметаллических частиц Pd-Au для катализаторов селективного окисления биосырья на примере 5-гидроксиметилфурфурала (ГМФ) [4].

В настоящей работе мы представляем развитие исследований по созданию сложных наноструктур на основе «темного» диоксида титана без использования дорогостоящей платины и их применение для фотокаталитической генерации водорода и селективного окисления ГМФ. Комбини-

руя лазерную абляцию, лазерную плазменную обработку и механоактивацию мы реализовали различные варианты модификации  $\text{TiO}_2$  активными металлами (Cu, Ni, Co), от допирования до создания гетероструктур, что позволило повысить эффективность генерации водорода и селективного окисления ГМФ, приблизив ее к материалам, модифицированным платиной.

*Исследование поддержано грантом РФФ № 19-73-30026-п.*

### Литература

1. L. Zhao, Z. Liu, D. Chen, F. Liu, Z. Yang, X. Li, H. Yu, H. Liu, W. Zhou, *Nano-Micro Lett.*, 13, 49 (2021).
2. A.V. Shabalina, V.A. Svetlichnyi, S.A. Kulinich, *Curr. Opin. Green Sustainable Chem.*, 33, 100566 (2022).
3. E. Fakhrutdinova, O. Reutova, L. Maliy, T. Kharlamova, O. Vodyankina, V. Svetlichnyi, *Materials*, 15, 7413 (2022).
4. K.L. Timofeev, T.S. Kharlamova, D.M. Ezhov, M.A. Salaev, V.A. Svetlichnyi, O.V. Vodyankina, *Appl. Catal. A*, 656, 119121 (2023).

## УЗКОПОЛОСНАЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ ОЛОВО-ВАКАНСИЯ В CVD-АЛМАЗНЫХ МИКРОКРИСТАЛЛАХ

В. С. Седов<sup>1</sup>, А. К. Мартьянов, И. А. Тяжелов<sup>1,2</sup>, В. Г. Ральченко,  
А. Ю. Нелюбов, А. В. Наумов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН,  
Россия, г. Москва, [sedovvadim@yandex.ru](mailto:sedovvadim@yandex.ru)

<sup>2</sup>Институт спектроскопии РАН, Россия, г. Троицк

Центры окраски в алмазе на основе примесных элементов из IV группы, такие как кремний-вакансия (Si-V), германий-вакансия (Ge-V) и олово-вакансия (Sn-V), обладают узкополосной фотолюминесценцией (ФЛ) при комнатной температуре в видимом или ближнем ИК-диапазонах и, как следствие, привлекают значительное внимание в связи с возможными приложениями в квантово-информационных технологиях, биомедицине, а также при изготовлении субмикронных оптических термометров. Большой атомный радиус Sn приводит к более сильному расщеплению в основном состоянии, и поэтому структура спиновых уровней может быть разрешена при более высокой температуре ( $\approx 2$  К) со временем спиновой когерентности в миллисекундном диапазоне, что делает данный центр наиболее привлекательным по сравнению с центрами Si-V и Ge-V, которые требуют субкельвиновских режимов работы. Однако внедрение крупных атомов Sn в плотную решетку алмаза является нетривиальной задачей. Целью нашей работы является использование химического осаждения из газовой фазы (CVD) для синтеза легированного оловом алмаза с субмикронными частицами  $\text{SnO}_2$  в качестве твердотельного источника примеси. На подложках AlN были выращены хорошо огранные микро-

кристаллы алмаза размером несколько микрон, на которых был обнаружен сигнал ФЛ с пиком БФЛ для центра Sn-V при  $\approx 620$  нм. Измеренная полуширина пика составила 1,1–1,7 нм при КТ и  $\approx 0,05$  нм при 7 К. Обнаружены значительные смещения положения БФЛ (до 10 нм от БФЛ), что мы связываем с напряжениями в кристаллитах. Легирование алмаза оловом *in-situ* в процессе CVD-синтеза открывает новый путь для формирования центров окраски Sn-V в объеме алмазных частиц, плёнок и монокристаллов.

*Работа поддержана грантом РФФ № 21-72-10153.*

#### Литература

1. V. Sedov, A. Martyanov, S. Savin, A. Bolshakov, E. Bushuev, A. Khomich, O. Kudryavtsev, V. Krivobok, S. Nikolaev, V. Ralchenko, *Diam. Relat. Mater.*, 90, 47–53 (2018).

## РАСЧЕТ ТОКСИЧНОСТИ МОНОМЕРА И ПОЛИМЕРА ИОННОЙ ЖИДКОСТИ

Н. М. Седых

*Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН,  
Россия, г. Новосибирск, [googo@mail.ru](mailto:googo@mail.ru)*

Разработаны и успешно развиваются подходы к направленному синтезу новых функциональных гетероциклических и хиральных фосфорорганических соединений [1–10] непосредственно из элементного фосфора (реакция Трофимова – Гусаровой), в том числе, с использованием явления дефектообразования в твердой структуре этого химического элемента [1–4]. Получены не известные ранее гипофосфиты 1-Н-, 1-алкил-, и 1-винил-3Н-имдазолия, являющиеся ионными жидкостями при комнатной температуре. Целью работы явилось расчетное прогнозирование экологической токсичности этих новых фосфорсодержащих ионных жидкостей. Расчеты проводили с использованием модели *quantitative structure–activity relationships* (QSARs) для оценки физико-химических и экологотоксикологических свойств новых ионных жидкостей. Модель демонстрирует метод группового вклада, который рассматривает три основные группы дескрипторов в структуре ионной жидкости: анион, катион и замещения (углеродные цепи, связанные с катионом). Основываясь на этих дескрипторах, их вклад в экотоксичность ионной жидкости был оценен с помощью мультилинейной регрессионной модели. Полученные результаты с использованием модели QSARs для оценки экологической токсичности новых ионных жидкостей коррелируют с литературными данными для подобных соединений.

#### Литература

1. Н.К. Гусарова, С.И. Шайхутдинова, Т.И. Казанцева, Б.Г. Сухов, В.И. Дмитриев, Л.М. Синеговская, Н.П. Тарасова, Б.А. Трофимов, *Хим. гетероцикл. соед.*, № 5, 628–632 (2001).



2. Н.К. Гусарова, С.И. Шайхутдинова, Т.И. Казанцева, С.Ф. Малышева, Б.Г. Сухов, Н.А. Белогорлова, В.И. Дмитриев, Б.А. Трофимов, *Ж. общей химии*, 72(3), 399–403 (2002).
3. Б.Г. Сухов, Н.К. Гусарова, С.Ф. Малышева, Б.А. Трофимов, *Изв. Акад. наук, Сер. хим.*, № 6, 1172–1185 (2003).
4. Б.А. Трофимов, Б.Г. Сухов, С.Ф. Малышева, Н.К. Гусарова, *Катализ в промышленности*, № 4, 18–23 (2006).
5. N.K. Gusarova, S.I. Shaikhudinova, S.N. Arbuzova, T.I. Vakul'skaya, B.G. Sukhov, L.M. Sinegovskaya, M.V. Nikitin, A.G. Mal'kina, N.A. Chernysheva, B.A. Trofimov, *Tetrahedron*, 59(26), 4789–4794 (2003).
6. B.A. Trofimov, B.G. Sukhov, S.F. Malysheva, N.A. Belogorlova, A.P. Tantsirev, L.N. Parshina, L.A. Oparina, S.P. Tunik, N.K. Gusarova, *Tetrahedron Lett.*, 45(49), 9143–9145 (2004).
7. N.K. Gusarova, N.I. Ivanova, M.V. Bogdanova, S.F. Malysheva, N.A. Belogorlova, B.G. Sukhov, B.A. Trofimov, *Mendeleev Commun.*, 14(5), 216–217 (2004).
8. B.A. Trofimov, S.F. Malysheva, N.K. Gusarova, N.A. Belogorlova, S.F. Vasilevsky, V.B. Kobychiev, B.G. Sukhov, I.A. Ushakov, *Mendeleev Commun.*, 17(3), 181–182 (2007).
9. B.A. Trofimov, S.F. Malysheva, N.K. Gusarova, V.A. Kuimov, N.A. Belogorlova, B.G. Sukhov, *Tetrahedron Lett.*, 49(21), 3480–3483 (2008).
10. N.K. Gusarova, S.F. Malysheva, L.A. Oparina, N.A. Belogorlova, A.P. Tantsyrev, L.N. Parshina, B.G. Sukhov, R.T. Tlegenov, B.A. Trofimov, *Arkivoc*, № 7, 260–267 (2009).

## ПРИДАНИЕ ПРОТОНОПРОВОДЯЩИХ СВОЙСТВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТРЕКОВОЙ МЕМБРАНЕ ЗА СЧЕТ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ИОННОЙ ЖИДКОСТИ С ПОДВИЖНЫМ ПРОТОНОМ В ТРЕКОВЫХ ПОРАХ

Н. М. Седых<sup>1</sup>, Б. Г. Сухов<sup>1</sup>, А. Н. Чеснокова<sup>2</sup>, Н. А. Иванов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН,  
Россия, г. Новосибирск, [googo@mail.ru](mailto:googo@mail.ru)

<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Россия, г. Иркутск

Развиваются подходы к направленному синтезу новых функциональных гетероциклических и хиральных фосфорорганических соединений [1–10] непосредственно из элементного фосфора (реакция Трофимова-Гусаровой), в том числе с использованием явления дефектообразования в твердой структуре этого химического элемента [1–4]. Получен не известный ранее гипофосфит 1-винил-3Н-имидазолия, являющийся ионной жидкостью при комнатной температуре. Композитные полимерные пленки, полученные путем заполнения трековых пор диэлектрической трековой мембраны из полиэтилентерефталата ионной жидкостью с последующей ее винильной полимеризацией в порах, позволяет увеличить примерно на 8 порядков электропроводность этой пленки (с  $10^{-12}$  См·см<sup>-1</sup> до  $10^{-4}$  См·см<sup>-1</sup>).

### Литература

1. Н.К. Гусарова, С.И. Шайхутдинова, Т.И. Казанцева, Б.Г. Сухов, В.И. Дмитриев, Л.М. Синеговская, Н.П. Тарасова, Б.А. Трофимов, *Хим. гетероцикл. соед.*, № 5, 628–632 (2001).

2. Н.К. Гусарова, С.И. Шайхутдинова, Т.И. Казанцева, С.Ф. Малышева, Б.Г. Сухов, Н.А. Белогорлова, В.И. Дмитриев, Б.А. Трофимов, *Ж. общей химии*, 72(3), 399–403 (2002).
3. Б.Г. Сухов, Н.К. Гусарова, С.Ф. Малышева, Б.А. Трофимов, *Изв. Акад. наук, Сер. хим.*, № 6, 1172–1185 (2003).
4. Б.А. Трофимов, Б.Г. Сухов, С.Ф. Малышева, Н.К. Гусарова, *Катализ в промышленности*, № 4, 18–23 (2006).
5. N.K. Gusarova, S.I. Shaikhudinova, S.N. Arbuzova, T.I. Vakul'skaya, B.G. Sukhov, L.M. Sinegovskaya, M.V. Nikitin, A.G. Mal'kina, N.A. Chernysheva, B.A. Trofimov, *Tetrahedron*, 59(26), 4789–4794 (2003).
6. B.A. Trofimov, B.G. Sukhov, S.F. Malysheva, N.A. Belogorlova, A.P. Tantsirev, L.N. Parshina, L.A. Oparina, S.P. Tunik, N.K. Gusarova, *Tetrahedron Lett.*, 45(49), 9143–9145 (2004).
7. N.K. Gusarova, N.I. Ivanova, M.V. Bogdanova, S.F. Malysheva, N.A. Belogorlova, B.G. Sukhov, B.A. Trofimov, *Mendeleev Commun.*, 14(5), 216–217 (2004).
8. B.A. Trofimov, S.F. Malysheva, N.K. Gusarova, N.A. Belogorlova, S.F. Vasilevsky, V.B. Kobychyev, B.G. Sukhov, I.A. Ushakov, *Mendeleev Commun.*, 17(3), 181–182 (2007).
9. B.A. Trofimov, S.F. Malysheva, N.K. Gusarova, V.A. Kuimov, N.A. Belogorlova, B.G. Sukhov, *Tetrahedron Lett.*, 49(21), 3480–3483 (2008).
10. N.K. Gusarova, S.F. Malysheva, L.A. Oparina, N.A. Belogorlova, A.P. Tantsyrev, L.N. Parshina, B.G. Sukhov, R.T. Tlegenov, B.A. Trofimov, *Arkivoc*, № 7, 260–267 (2009).

## ИССЛЕДОВАНИЕ А-ПОЛОСЫ В АЛМАЗЕ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Э. С. Сектаров<sup>1,2</sup>, К. Н. Болдырев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт спектроскопии РАН, Россия, г. Троицк, [sektarov\\_es@mail.ru](mailto:sektarov_es@mail.ru)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,  
Россия, г. Москва

А-полоса является характерной чертой многих алмазов, её можно наблюдать как в натуральных, так и в синтетических алмазах. А-полоса активно используется в алмазодобывающей промышленности для сепарации от остальных пород, благодаря своей длительной люминесценции при комнатной температуре [1]. Выделяется три основных вида происхождения А-полосы: излучательная рекомбинация, электрон-дырочная рекомбинация и переходы между центрами окраски [2]. Понимание природы А-полосы даст информацию не только о фундаментальных физических процессах в алмазе, но и возможность её использование для квантовых применений.

В данном исследовании использовались алмазы допированные бором, фосфором и азотом.

Измерения были проведены методом получения спектров рентгенолюминесценции при температурах от  $-196^{\circ}\text{C}$  до  $500^{\circ}\text{C}$ . Для получения характеристического рентгеновского излучения использовалась трубка БСВ29-Мо с энергией фотонов  $\sim 18$  кэВ. Были получены спектры времен жизни А-полосы при разных температурах.

В ходе исследований были получены температурные и временные зависимости А-полосы. При низких температурах ( $T = -196^\circ\text{C}$ ) в образцах с бором наблюдалась фосфоресценция алмаза в области А-полосы после облучения рентгеновским излучением, длительностью более 120 секунд. При повышении температуры время жизни А-полосы сокращалось более чем в 4 раза. Наблюдалось трёхкомпонентное уменьшение интенсивности люминесценции. Максимум интенсивности рентгенолюминесценции достигался при температурах от  $170$  до  $220^\circ\text{C}$ . Также было выявлено максимальное сужение линии при рентгенолюминесценции при температуре  $200^\circ\text{C}$ .

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научно-го фонда № 19-72-10132. Авторы являются членами ведущей научной школы Российской Федерации «Опτικο-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (грант Президента РФ НШ-776.2022.1.2).*

#### Литература

1. V.P. Mironov, A.S. Emelyanova, S.A. Shabalin, E.V. Bubyр, L.V. Kazakov, E.F. Martynovich, *AIP Conf. Proc.*, 292, 020010 (2021).
2. A.M. Zaitsev. *Optical Properties of Diamond: A Data Handbook*. Berlin: Springer, 2001. 502 p.

## О МЕХАНИЗМАХ ЗАПУСКА АПОПТОЗА КЛЕТОК ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ НОВООБРАЗОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИОКОНЬЮГАТОВ МАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ И РЕЖИМА НЕГРЕЮЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

П. Н. Сёмина

*Сибирский федеральный университет,  
Международный научно-исследовательский центр спектроскопии  
и квантовой химии, Россия, г. Красноярск, [polina\\_semina@mail.ru](mailto:polina_semina@mail.ru)*

В разработке тераностических безопасных и эффективных методов особое внимание уделяется магнитомеханическому влиянию на клетки мишени с использованием биоконьюгатов на основе магнитных наночастиц (МНЧ) в переменном магнитном поле низкой частоты и при отсутствии нагрева. Одной из компонент биоконьюгата, способствующей селективному связыванию с клетками мишени, являются аптамеры. В экспериментах *in vivo* и *in vitro* наблюдалось эффективное подавление деления клеток карциномы Эрлиха мыши с использованием магнитомеханической терапии. Связывание аптамеров с клетками опухоли обеспечено молекулярным сродством с механорецепторами – трансмембранными белками. Показано, что силовое воздействие на трансмембранный белок, превышающее пороговое значение силы и создаваемое движением маг-

нитной наночастицы в переменном негреющем магнитном поле, связанной при помощи аптамера с белком, может запускать каскад внутриклеточных реакций, приводящих к апоптозу клетки опухоли. Предложены схемы реализации магнитодинамической терапии онкологических заболеваний и наиболее вероятные сценарии повреждающего механического воздействия на мембраны злокачественных клеток с использованием магнитных наночастиц различных конфигураций, функционализированных аптамерами. Проанализированы требования к магнитным наночастицам и их пригодности для биомедицинских приложений. Обращено внимание на возможность образования многочастичных агрегатов из магнититовых наночастиц во внешнем магнитном поле и их локализации вблизи мембран злокачественных клеток. Показано, что сценарий, включающий в себя процесс агрегации наночастиц магнетита, обеспечивает механическое воздействие, амплитуда которого достаточна для достижения терапевтического эффекта. Подтверждена возможность применения функционализированных аптамерами МНЧ в переменном магнитном поле низкой частоты для успешной терапии злокачественных новообразований.

## ВЛИЯНИЕ ТГц ПОЛЯ НА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ В GaAs

С. Б. Бодров, А. И. Корытин, Ю. А. Сергеев, А. Н. Степанов

*Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики  
им. А. В. Гапонова-Грехова РАН, Россия, г. Нижний Новгород,  
[yas@ufp.appl.sci-nnov.ru](mailto:yas@ufp.appl.sci-nnov.ru)*

В данной работе исследовалось спонтанное оптическое излучение кристалла GaAs, облучаемого одновременно мощным терагерцовым и оптическим фемтосекундным импульсами на длине волны 795 нм.

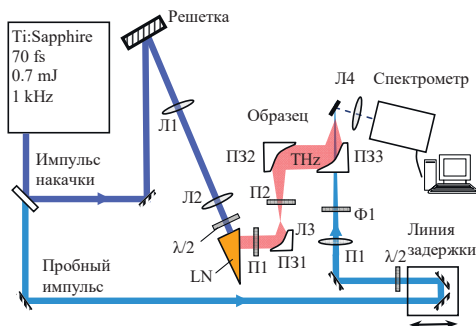


Рис. Схема экспериментальной установки (Л1, Л2, Л3, Л4 – линзы; ПЗ1, ПЗ2, ПЗ3 – параболические зеркала; LN – LiNbO<sub>3</sub>; П1–поляризатор; Ф1 –оптические фильтр П1,П2 – ТГц поляризатор).

Для исследования использовалась титан-сапфировая лазерная система Spitfire, генерирующая фемтосекундные импульсы с энергией 0,7 мДж, центральной длиной волны 795 нм и длительностью 70 фс. Интенсивные ТГц импульсы генерировались с использованием техники наклонного фронта интенсивности. Максимальное электрическое поле терагерцового излучения достигало 250 кВ/см.

Было обнаружено снижение интенсивности оптической люминесценции при воздействии ТГц поля на величину до 10 % в области максимума спектра люминесценции. Также было исследовано влияние поляризации ТГц поля, получены зависимости оптической люминесценции от амплитуды падающего ТГц поля, изучено изменение спектра оптического излучения при воздействии ТГц поля.

## ИК-ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ВИСМУТГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАТРИЕМ

К. С. Серкина, Д. В. Волкова, А. А. Трофимова,  
К. И. Рунина, И. В. Степанова

Российский химико-технологический университет  
им. Д. И. Менделеева, Россия, г. Москва, [serkina24@gmail.com](mailto:serkina24@gmail.com)

Германатные стекла, легированные висмутом, являются перспективной активной средой для перестраиваемых по частоте лазеров, работающих в ближнем ИК-диапазоне. Данные стекла обладают уникальной широкополосной люминесценцией в области 1000–1500 нм, источником которой служат висмутовые активные центры [1].

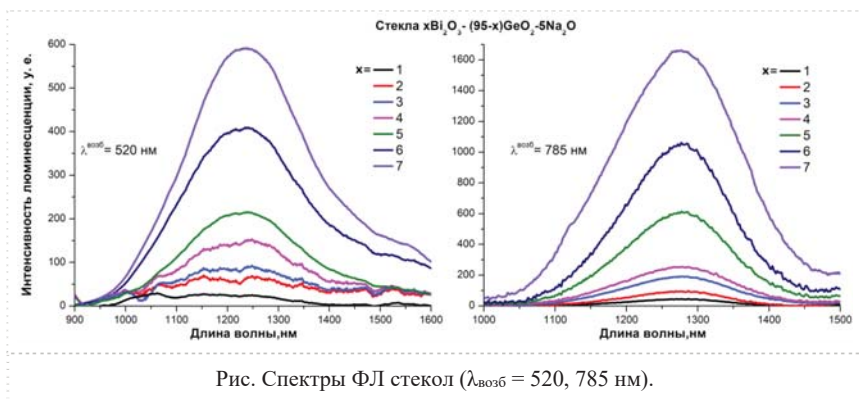


Рис. Спектры ФЛ стекол ( $\lambda_{\text{возб}} = 520, 785 \text{ нм}$ ).

В данной работе висмутгерманатные стекла с малым содержанием  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  модифицировали оксидом натрия для улучшения их оптического качества [2]. Были исследованы стекла состава  $x\text{Bi}_2\text{O}_3 - (95-x)\text{GeO}_2 - 5\text{Na}_2\text{O}$ , где  $x = 1-7$  мол.%. Синтез проводили выдержкой расплава при темпера-

туре 1100°C в течение 30 мин. Спектры фотолюминесценции регистрировали с помощью спектрометра NIR Quest 512 при  $\lambda_{\text{возб}} = 520$  нм и 785 нм.

При  $\lambda_{\text{возб}} = 520, 785$  нм стекла обладают широкополосной люминесценцией в диапазоне 1–1,6 мкм, связанной с ВАЦ [1], интенсивность ФЛ возрастает с увеличением содержания  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ .

### Литература

1. E.M. Dianov, *Light Sci. Appl.*, 1, e12 (2012).
2. Z. Zhang, J. Cao, J. Zheng, M. Peng, S. Xu, Z. Yang, *Chin. Opt. Lett.*, 15(12), 121601 (2017).

## ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ, ЛЕГИРОВАННЫХ ВИСМУТОМ, ЭРБИЕМ, ИТТЕРБИЕМ

К. С. Серкина, Ю. В. Жегучева, К. И. Рунина, И. В. Степанова

Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,  
Россия, г. Москва, [serkina24@gmail.com](mailto:serkina24@gmail.com)

В данной работе исследовано влияние легирования парой редкоземельных ионов  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  на спектрально-люминесцентные свойства висмутгерманатных стекол. Синтезированные стекла имеют состав:  $x\text{Bi}_2\text{O}_3-(100-x)\text{GeO}_2-y\text{Er}_2\text{O}_3-z\text{Yb}_2\text{O}_3$ , где  $x = 9, 10$ ;  $y = 0, 0,1$ ;  $z = 0, 0,2$  мол.%. Синтез стекол проводили в корундовых тиглях при температуре 1100 °С в течение 30 мин с последующим отливом расплава на подложку, затем стекла отжигали при 350 °С в течение 3 ч. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) при  $\lambda_{\text{возб}} = 377$  нм измеряли на спектрофлуориметре Fluorolog FL3-22 в диапазоне длин волн 400–720 нм.

Германатные стекла, легированные ионами  $\text{Bi}/\text{Er}/\text{Yb}$ , демонстрируют сложные спектры ФЛ (рис. 1) в видимой области, которые представляют собой комбинацию полос  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Bi}^{3+}$  [1].

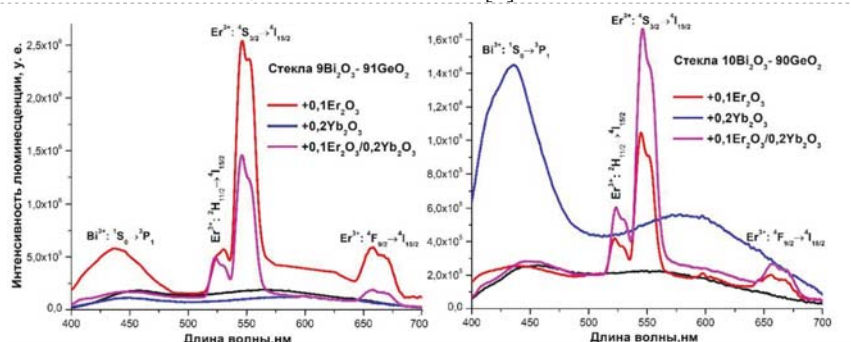


Рис. 1. Спектры ФЛ стекол  $\lambda_{\text{возб}} = 377$  нм: слева – состав матрицы  $9\text{Bi}_2\text{O}_3-91\text{GeO}_2$ , справа – состав матрицы  $10\text{Bi}_2\text{O}_3-90\text{GeO}_2$

В зависимости от исходной матрицы  $x\text{Bi}_2\text{O}_3-(100-x)\text{GeO}_2$  и/или присутствия в стекле ионов иттербия изменяется интенсивность и контур люминесценции, что объясняется взаимодействием активных ионов в матрице германатного стекла [2].

#### Литература

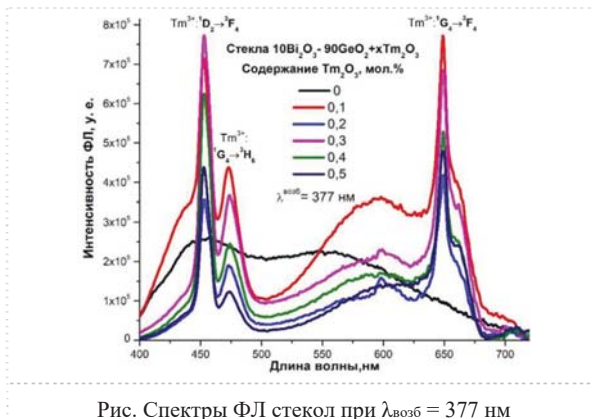
1. Q. Xu, B. Lin, Y. Mao, *J. Lumin.*, 128(12), 1965–1968 (2008).
2. V. Singh, V.K. Rai, K. Al-Shamery, J. Nordmann, M. Haase, *J. Lumin.*, 131(12), 2679–2682 (2011).

## ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ ОКСИДОМ ТУЛИЯ НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ВИСМУТГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ

К. С. Серкина, А. В. Король, А. В. Ефимочкина,  
К. И. Рунина, И. В. Степанова

Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,  
Россия, г. Москва, [serkina24@gmail.com](mailto:serkina24@gmail.com)

В данной работе исследуется влияние легирования тулия на спектрально-люминесцентные свойства висмутгерманатных стекол. В ходе работы получены стекла составов:  $10\text{Bi}_2\text{O}_3-90\text{GeO}_2-x\text{Tm}_2\text{O}_3$ , где  $x = 0-0,5$  мол.%. Исходные шихты расплавляли в корундовых тиглях на воздухе при  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 30 мин, расплав отливали на металлическую подложку комнатной температуры и отжигали при  $350\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 3 ч. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) при  $\lambda_{\text{возб}} = 377\text{ нм}$  снимали на спектрофлуориметре Fluorolog FL3-22 в диапазоне длин волн  $400-720\text{ нм}$ .



Висмутгерманатные стекла демонстрируют полосу ФЛ, характерную для  $\text{Bi}^{3+}$ , в диапазоне  $400-700\text{ нм}$  [1]. Легирование тулием ( $x = 0,1$  мол.%) приводит к увеличению интенсивности ФЛ, усложнению

ее контура: на фоне широкой полосы проявляются узкие полосы  $Tm^{3+}$  (452, 472 и 648 нм) [2]. Дальнейшее увеличение содержания  $Tm_2O_3$  приводит к уменьшению интенсивности люминесценции, вероятно, связанно с концентрационным тушением.

#### Литература

1. В. Xu, D. Tan, S. Zhou, Z. Hong, K.N. Sharafudeen, J. Qiu, *Opt. Express*, 20(27), 29105–29110 (2012).
2. В. Fan, J. Liu, W. Zhao, S. Qi, *Opt. Mater.*, 90, 33–39 (2019).

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ НАПРЯЖЕНИЙ В МАТЕРИАЛАХ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В. А. Симонова<sup>1,2</sup>, А. С. Бычков<sup>1</sup>, Е. Д. Залозная<sup>1</sup>, А. А. Карабутов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики  
им. Н. Л. Духова, Россия, г. Москва, [vas@optoacoustics.ru](mailto:vas@optoacoustics.ru)*

<sup>2</sup>*Научный центр волновых исследований Института общей физики  
им. А. М. Прохорова РАН, Россия, г. Москва*

Лазерный ультразвуковой метод является контактным методом диагностики, который демонстрирует возможность оценки процесса аддитивной обработки металлов [1].

Принцип работы экспериментальной установки основан на термооптическом возбуждении ультразвуковых импульсов продольных акустических волн в специальном широкополосном оптико-акустическом преобразователе и измерении скорости распространения этих импульсов в исследуемом объекте с односторонним доступом к объекту [2].

Представлены результаты лазерной ультразвуковой диагностики оребренных панелей из АМг-9 (сплав Al-Mg) с помощью лазерного ультразвукового дефектоскопа и ультразвукового преобразователя с наклонным вводом. Проведено тестирование панелей с помощью автоматической системы 2D сканирования (точность позиционирования составляет 0,05 мм) и измерены компоненты напряжений, направленные вдоль направления распространения УЗ волны ( $\sigma_{xx}$  и  $\sigma_{yy}$ ). Измерение акустоупругого коэффициента сведено к исследованию зависимости скорости ультразвука в исследуемом материале от прилагаемого растягивающего или сжимающего напряжения. Измерен коэффициент акусто-упругой связи с точностью 9 %. Представлены численные значения рассчитанных по вариациям скоростей ультразвука компонент тензора напряжений в приповерхностной (глубиной до 1–2 мм) зоне образцов.

#### Литература

1. W.E. Frazier, *J. Mater. Eng. Perform.*, 23, 1917–1928 (2014).
2. Д.И. Макалкин, А.А. Карабутов, Е.В. Саватеева, В.А. Симонова, *Доклады РАН. Физика, технические науки*, 502(1) 63–66 (2022).



## ОРГАНИЧЕСКИЕ ЛЮМИНОФОРЫ С ФОТОИНДУЦИРОВАННЫМ ПЕРЕНОСОМ ЗАРЯДА: ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ

Е. А. Слюсарева

*Сибирский федеральный университет,  
Россия, г. Красноярск, [ESlyusareva@sfu-kras.ru](mailto:ESlyusareva@sfu-kras.ru)*

Оптические спектры органических молекул существенно зависят от наличия и числа  $\pi$ -сопряженных групп в их структуре. При фотовозбуждении может происходить существенная перестройка структуры молекулы как за счет переноса протона с участием растворителя (протолитические реакции), так и за счет перестройки самой молекулы без изменения ее заряда (таутомерные реакции). В первом случае говорят о межмолекулярном, в другом – о внутримолекулярном переносе заряда. Возможность протекания таких процессов и их эффективность определяется структурой органического вещества и управляется внешними факторами, среди которых температура, вязкость, присутствие внешних ионов и т. д.

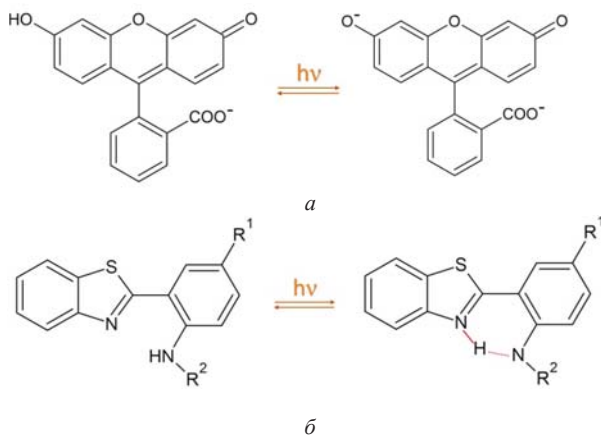


Рис. Примеры люминофоров с меж- (а) и внутримолекулярным (б) переносом заряда, приводящем к значительной перестройке электронной структуры и флуоресцентных свойств

На рисунке приведены органические соединения, проявляющие подобные свойства. При фотовозбуждении электронная структура хромофора подвергается сильной реконструкции. Из-за этого в первом случае люминофор переходит из моноанионного состояния с квантовым выходом 0,37 в дианионное с квантовым выходом 0,93 [1]. В другом случае испытывает аномальный стоксов сдвиг (более 200 нм) со смещением спектра испускания в красную область [2].

В лекции будет рассмотрены экспериментальные стационарные и время-разрешенные флуоресцентные методы и теоретические подходы (кинетические и квантово-химические) изучения подобных систем. Положение спектра флуоресценции и изменение интенсивности можно использовать в качестве аналитических сигналов во флуоресцентном зондировании, а сами люминофоры в качестве цветных флуоресцентных чернил, лазерных сред и спектральных преобразователей.

*Выполнено при поддержке РНФ, проект № 22-22-00724.*

#### **Литература**

1. R. Sjöback, J. Nygren, M. Kubista, *Spectrochim. Acta A*, 51(6), L7-L21 (1995).
2. Б.М. Болотин, *Хим. Пром. Сегодня*, №1, 18–24 (2014).

### **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CdSe/ZnS В БИОПОЛИМЕРНОМ КОМПОЗИТЕ С ЭРИТРОЗИНОМ В**

Н. В. Слюсаренко, М. А. Герасимова, Е. В. Парфёнова, Е. А. Слюсарева

*Сибирский федеральный университет, Россия, г. Красноярск,  
[sci\\_box@mail.ru](mailto:sci_box@mail.ru)*

Гибридные биосовместимые люминесцентные композиты находят применение в медицине и биологии в качестве биосенсоров и биомаркеров. Использование коллоидных квантовых точек как элемента таких систем является актуальным из-за их спектральных свойств, которые реагируют на изменение параметров окружения, например, температуры [1]. Однако коллоидные квантовые точки на основе кадмия токсичны, поэтому является актуальным синтез биокompозитов с квантовыми точками, как для уменьшения вредного воздействия, так и для создания систем с улучшенными сенсорными свойствами.

В работе синтезированы композиты на основе биополимерных частиц размерами около 0,4 мкм с коллоидными квантовыми точками CdSe/ZnS по методике из работы [1]. В композите с дополнительно введенным красителем эритрозином В может наблюдаться резонансный перенос энергии за счет наличия спектрального перекрытия и высокой локальной концентрации донорно-акцепторных пар.

Показано, что введение акцептора энергии в состав композита приводит к увеличению тушения интенсивности спектра ФЛ квантовых точек в исследуемом температурном диапазоне (283–333 К) на 40 % по сравнению с квантовыми точками в воде. Увеличение тушения интенсивности квантовых точек обсуждено в терминах совместного действия механизмов температурного тушения и резонансного переноса энергии в системе донор-акцептор. Результаты могут быть использованы для создания температурных динамических сенсоров.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант МК-995.2022.1.2) и программы «Приоритет 2030», проект «Создание новых люминесцентных материалов полифункционального назначения».*

### Литература

1. Н.В. Слюсаренко, М.А. Герасимова, В.В. Слабко, Е.А. Слюсарева, *Изв. вузов. Физика*, 60, 88–94 (2017).

## ДОЛИННЫЙ МАГНИТОФОНОННЫЙ РЕЗОНАНС В СКРУЧЕННЫХ БИСЛОЯХ ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

J. Holler<sup>1</sup>, T. Korn<sup>2</sup>, Д. С. Смирнов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Experimental and Applied Physics,  
University of Regensburg, Germany, Regensburg*

<sup>2</sup>*Institute of Physics, University of Rostock, Germany, Rostock,*

<sup>3</sup>*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН,  
Россия, г. Санкт-Петербург, [smirnov@mail.ioffe.ru](mailto:smirnov@mail.ioffe.ru)*

Вслед за детальным изучением графена внимание привлекли одинокослоенные монослои дихалькогенидов переходных металлов, такие как MoS<sub>2</sub>, MoSe<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, WSe<sub>2</sub> и др. Они представляют собой прямозонные полупроводники с шириной запрещенной зоны порядка 2 эВ, расположенной в эквивалентных точках K<sub>+</sub> и K<sub>-</sub> двумерной зоны Бриллюэна [1]. В настоящее время активно изучаются скрученные гетеробислои этих материалов, в которых муаровый потенциал приводит к локализации носителей заряда и возможности наблюдения экзотических многочастичных электронных фаз [2].

В данной работе теоретически предсказан и экспериментально обнаружен долинный магнитофононный резонанс с переворотом спина дырки в локализованном экситоне в бислое MoSe<sub>2</sub>/WSe<sub>2</sub> [3]. Резонанс происходит в продольном магнитном поле 24,2 Тл, когда зеэмановское расщепление между максимумами валентной зоны в точках K<sub>+</sub> и K<sub>-</sub> равно энергии поперечного акустического фонона в K точке зоны Бриллюэна в монослое MoSe<sub>2</sub>. В этих условиях резонансно усиливается степень циркулярной поляризации фотолюминесценции как для параллельной (R-тип), так и для антипараллельной (H-тип) относительной ориентации монослоев несмотря на более чем трёхкратное отличие зеэмановских расщеплений экситонных уровней в этих структурах. Микроскопический механизм долинного магнитофононного резонанса связан с комбинацией междолинного рассеяния электрона в экситоне с сохранением спина и междолинного рассеяния экситона как целого за счёт дальнедействующего обменного взаимодействия электрона и дырки.

*Работа поддержана грантом РФФ № 21-72-10035.*

## Литература

1. G. Wang, A. Chernikov, M.M. Glazov, T.F. Heinz, X. Marie, T. Amand, B. Urbaszek, *Rev. Mod. Phys.*, 90(2), 021001 (2018).
2. A. Ciarrocchi, F. Tagarelli, A. Avsar, A. Kis, *Nat. Rev. Mater.*, 7, 449–464 (2022).
3. D.S. Smirnov, J. Holler, M. Kempf, J. Zipfel, P. Nagler, M.V. Ballottin, A.A. Mitioglu, A. Chernikov, P.C.M. Christianen, C. Schüller, T. Korn, *2D Mater.*, 9(4), 045016 (2022).

## ДИПОЛЬ-ДИПОЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРАХ ДВУХ СПУТАННЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Е. А. Смирнова<sup>1,2,3</sup>, Н. А. Лозинг<sup>2,3</sup>, М. Г. Гладуш<sup>2,3,4</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», Россия, г. Москва*

<sup>2</sup>*Троицкое обособленное подразделение Физического института  
им. П. Н. Лебедева РАН, Россия, г. Троицк*

<sup>3</sup>*Московский педагогический государственный университет,  
Россия, г. Москва, [ekatri.smirnova@gmail.com](mailto:ekatri.smirnova@gmail.com)*

<sup>4</sup>*Институт спектроскопии РАН, Россия, г. Троицк*

Излучение от одиночных излучателей и их небольших ансамблей может служить источником информации о структуре материалов и состоянии среды, в которой источники располагаются. В данной работе излучается простейший кооперативный ансамбль – парный излучатель. Свет, испущенный парой излучателей, зависит от геометрий возбуждения и детектирования, а также от разности индивидуальных свойств излучателей. В данной работе производится расчётно-теоретический анализ взаимодействия двух близко расположенных (меньше половины длины волны изучения) неидентичных (по частотам перехода и дипольным моментам перехода) излучателей. Вывод управляющего уравнения для матрицы плотности кооперативного излучателя производился с помощью метода Боголюбова – Борна – Грина – Кирквуда – Ивона (ББГКИ), который позволяет согласованно описывать кооперативную систему частиц и испускаемое ими излучение. Были рассчитаны спектры возбуждения, испускания фотолюминесценции и поглощения пробного сигнала для различных геометрий возбуждения и детектирования, а также для различных индивидуальных свойств квантовых излучателей. Данная теоретическая работа находится в качественном согласии с экспериментальными данными [1; 2]. В экспериментальных работах измерялись спектры возбуждения пары органических молекул: в [1] были использованы молекулы террилена при температуре  $T \approx 1,4$  К, расположенные на расстоянии 12 нм в паратерфениле; в [2] были использованы молекулы дибензантантрена в нафталине при температуре  $T \approx 2$  К. Обе экспериментальные работы продемонстрировали, что при низких температурах диполь-дипольное сп-

тывание молекул могут быть описано с использованием модели взаимодействия двухуровневых квантовых систем.

Авторы доклада являются членами ведущей научной школы РФ «Опτικο-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (проект НШ-776.2022.1.2). Работа была выполнена в рамках темы Государственного задания МПГУ «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нанотехнологиях и фотонике» при поддержке Министерства Просвещения РФ (AAAA-A20-120061890084-9) совместно с Центром коллективного пользования «Структурная диагностика материалов» Федерального исследовательского центра РАН «Кристаллография и фотоника».

#### Литература

1. C. Hettich, C. Schmitt, J. Zitzmann, S. Kühn, I. Gerhardt, V. Sandoghdar, *Science*, 298(5592), 385–389 (2002).
2. J.B. Trebbia, Q. Deplano, P. Tamarat, B. Lounis, *Nat. Commun.*, 13(1), 2962 (2022).

## ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ В ОБЛАСТИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ S<sub>2</sub> СИСТЕМЫ В АЛМАЗЕ

Ф. А. Степанов, В. П. Миронов, А. Л. Ракевич, Е. Ф. Мартынович

*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН,  
Россия, г. Иркутск, [post@ilph.irk.ru](mailto:post@ilph.irk.ru)*

Исследованы фотолюминесценция и ее температурные зависимости пластин с системой S<sub>2</sub>, вырезанных из якутских алмазов по (001) или (011), толщиной около 0,5 мм, с использованием конфокального сканирующего флуоресцентного микроскопа MicroTime 200 при возбуждении лазерами с длинами волн 375 нм, 470 нм, 532 нм (рис.). Для регистрации спектров использован спектрометр QE65000 фирмы Ocean Optics. Исследования температурных зависимостей проведены при понижении температуры от 290 до 80 К. Спектры регистрировались через 10 градусов.

В эксперименте наблюдается два процесса: процесс нормального тушения центров N<sub>3</sub>, S<sub>2</sub> и процесс аномального тушения полосы при 510 нм. Аномалия состоит в снижении интенсивности свечения при снижении температуры.

Избирательное возбуждение люминесценции полосы 528 нм лазером с длиной волны 470 нм наблюдается в отдельных точках, иногда в сопровождении структуры с головной линией при 678 нм. Эта полоса независима от системы S<sub>2</sub>. Ее форма слабо изменяется при понижении температуры от 290 до 80 К, но интенсивность ее снижается почти в два раза.

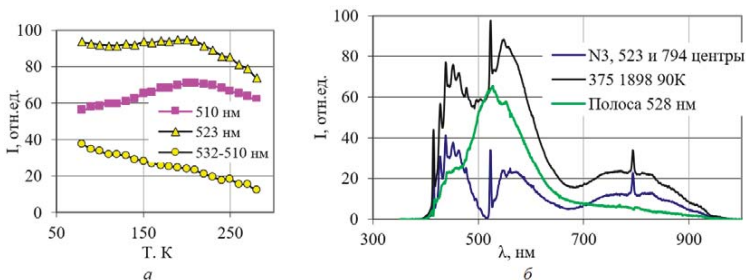


Рис. а – зависимость интенсивности линий в желто-зеленой области от температуры, возбуждение – лазер 375 нм; б – спектры центров с нормальным тушением: N3, S2a и 794 нм и спектр полосы с максимумом при 528 нм с аномальным тушением

*Работа поддержана научным проектом 0243-2021-0004 в рамках плана фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 г.*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ ГИБРИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СИСТЕМЕ ФТОРИДА СТРОНЦИЯ С 8-ОКСИХИНОЛЯТОМ ЛИТИЯ ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СООСАЖДЕНИЯ

П. В. Стрекалов<sup>1</sup>, И. И. Марзаева<sup>1</sup>, К. И. Рунина<sup>1</sup>,  
М. Н. Маякова<sup>1,2</sup>, О. Б. Петрова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,  
Россия, г. Москва, [strekalov.pavel@mail.ru](mailto:strekalov.pavel@mail.ru)

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Россия, г. Москва,  
[mn.mayakova@gmail.com](mailto:mn.mayakova@gmail.com)

Гибридные материалы (ГМ), содержащие органический люминофор в неорганической матрице, являются эффективными люминесцентными материалами. Ранее методом соосаждения из водно-спиртовых растворов уже были получены высокоэффективные люминесцентные ГМ, на основе  $\text{PbF}_2$ -содержащих матриц [1] и 8-оксихинолята лития (Liq).

В этом исследовании были синтезированы ГМ на основе неорганической матрицы фторида стронция, используя Liq в качестве органического компонента при варьировании условий синтеза: концентрация Liq от 1 до 5 масс. %, концентрация раствора  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ , порядок подачи реагентов. В результате соосаждения получены однофазные образцы по своей кристаллической структуре соответствующие  $\text{SrF}_2$  (пр. гр.  $Fm\bar{3}m$ ).

Сравнение спектров люминесценции ГМ и исходного порошкового препарата Liq показало, что широкая полоса люминесценции заметно смещена в сторону более коротких длин волн ( $\lambda^{\text{max}} = 430$  нм) по сравнению с исходным Liq ( $\lambda^{\text{max}} = 450$  нм). Очевидно, что коротковолновая компо-

нента не связана с центрами  $\text{Srq}_2$  и  $[\text{SrqF}]_2$ , которые люминесцируют в более длинноволновой области, чем  $\text{Liq}$ . Можно предположить, что введение электроноакцепторных групп, таких как фтор (F-группа в положении С-6) в безольное кольцо оксихинолина может привести к синему сдвигу длины волны люминесценции полученных гибридных материалов. Энергетический зазор между НОМО и LUMO увеличится, и длина волны флуоресценции соединений будет уменьшаться [2].

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования, Госзадание FSSM-2020-0005.*

### Литература

1. П.В. Стрекалов, М.Н. Маякова, К.И. Рунина, О.Б. Петрова, *Цвет. мет.*, № 10, 25–31 (2021).
2. Y.W. Shi, M.M. Shi, J.C. Huang, H.Z. Chen, M. Wang, X.D. Liu, Y.G. Ma, H. Xu, B. Yang, *Chem. Commun.*, 18, 1941–1943 (2006).

## УФ → ИК ДАУН-КОНВЕРСИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ ШЕЕЛИТОПОДОБНЫХ МОЛИБДАТОВ И ВОЛЬФРАТОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ УЬ

К. А. Субботин<sup>1,2</sup>, Д. А. Лис<sup>1</sup>, А. И. Титов<sup>1,2</sup>, О. К. Алимов<sup>1</sup>,  
Е. В. Жариков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Россия, г. Москва, [soubbot@lsk.gpi.ru](mailto:soubbot@lsk.gpi.ru)*

<sup>2</sup>*Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, Россия, г. Москва*

КПД фотовольтаического преобразования в стандартных фотоэлементах на основе кристаллического кремния ограничен теоретическим пределом Шокли – Квейзера, составляющим 31 %. Однако применение кооперативного даун-конверсионного преобразования солнечного света (quantum cutting) способно существенно, вплоть до 38,6 %, поднять этот предел без кардинальной переделки архитектуры фотоэлемента, а просто путем введения дополнительного слоя даун-конвертера. Поиск эффективных материалов таких даун-конвертеров является актуальной задачей.

Нами показано, что кристаллы шеелитоподобных молибдатов и вольфраматов, легированных ионами иттербия, имеют значительный потенциал использования в данном качестве. Проведенный комплекс спектрально-люминесцентных исследований показал, что при оптическом возбуждении кристаллов в ближней УФ-области спектра наблюдается интенсивная люминесценция ионов  $\text{Yb}^{3+}$  в районе 1 мкм. Эффективность фотовольтаического преобразования кристаллическим кремнием излучения данного диапазона максимальна. Более того, показано, что при значительных концентрациях УЬ в кристаллах включается механизм коопера-

тивной даун-конверсии, при котором поглощенные УФ-кванты преобразуются в удвоенное количество квантов излучения  $\text{Yb}^{3+}$ , что и должно в первую очередь повышать эффективность солнечных батарей.

Однако конкретный механизм данного даун-конверсионного преобразования до последнего времени оставался не до конца понятным. В частности, не было ясно, какие именно оптические центры поглощают УФ-излучение возбуждения, поскольку сами ионы  $\text{Yb}^{3+}$  имеют поглощение лишь в области более жесткого УФ-диапазона (переход с переносом заряда). Нами отработан целый ряд версий природы таких центров: автолокализованные экситоны в молибдатных/вольфраматных комплексах; центры окраски на основе кислородных или катионных вакансий; случайные примеси; ионы  $\text{Yb}^{2+}$ . Оказалось, что наибольший вклад дают ионы  $\text{Yb}^{2+}$ , хотя в области длин волн возбуждения короче 300 нм начинает проявляться и вклад внутрицентровых процессов в ионах  $\text{Yb}^{3+}$ .

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки (грант FSSM-2020-0005).*

## МЕХАНИЗМЫ ВЛИЯНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ СИГНАЛ ФЛУОРЕСЦЕИНА

Д. П. Суржикова, Е. А. Слюсарева

*Сибирский федеральный университет,  
Россия, г. Красноярск, [darva19578@yandex.ru](mailto:darva19578@yandex.ru)*

Органический краситель флуоресцеин нашел применение в различных сферах начиная от маркирования бесцветных сред, заканчивая применением красителя в качестве активной среды в лазерах на красителях. Флуорофор представлен набором ионных форм, сосуществующих в равновесии при различных значениях pH. В физиологическом диапазоне pH 4–8, краситель существует в виде равновесной концентрации дианионной (D) и моноанионной (M), отличающимися квантовыми выходами  $\sim 2,5$  раза. Благодаря различию спектральных характеристик, краситель используется в качестве флуоресцентного pH зонда. В качестве аналитического сигнала можно использовать ратиометрический флуоресцентный сигнал. Отношение интенсивностей при возбуждении преимущественно D и M форм красителя – 488 и 435 нм, соответственно. Однако краситель чувствителен различным характеристикам микроокружения, такие как протон-акцепторные и протон-донорные добавок [1], что осложняет однозначную интерпретацию флуоресцентного сигнала в pH шкале.

Еще одной характеристикой, влияющей на излучение, является температура. Ранее [2] была получена зависимость ратиометрического сигнала от температуры для различных значений pH. Сигнал возрастает линейно с различным угловым коэффициентом. Были выдвинуты несколько



возможных гипотез влияния температуры на ратиометрический сигнал: изменение ионного равновесия в основном и возбужденном состояниях, уменьшение квантового выхода каждой ионной формы.

Для оценки влияния каждого из факторов, были измерены температурные спектры поглощения и флуоресценции M и D ионных форм и смеси при pH 6 и 6,5. При анализе полученных спектров, определены значения ионных равновесий в основном и возбужденном состояниях в зависимости от температуры. Показано направление смещения на 0,25 ед. pH в кислую область для основного и возбужденного состояния. Смещение одинаково для обоих значений pH. Уменьшение квантового выхода M и D форм было оценено путем отношения флуоресцентного и радиационного времен жизни. Результат работы увеличит информативность флуоресцентного сигнала красителя флуоресцеина и его гомолога флуоресцеиназотиоцианата в сложных системах.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (РНФ) проект № 22-22-00724.*

#### Литература

1. Д.П. Суржикова, М.А. Герасимова, Е.А. Слюсарева, *Изв. РАН Сер. физ.*, 86(10), 1452–1456 (2022).
2. Д.А. Лях, Д.П. Суржикова, Е.А. Слюсарева, Сборник тезисов докладов Всероссийской научной конференции с международным участием «Енисейская Фотоника – 2022» (Красноярск, 2022). Т. 2, С. 147–148.

## ОПТИЧЕСКИЙ КОГЕРЕНТНЫЙ ТОМОГРАФ С УСИЛЕНИЕМ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА В АКТИВНОМ ВОЛОКНЕ

В. П. Суровцева<sup>1</sup>, Н. В. Коваленко<sup>2</sup>, О. А. Рябушкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Россия, г. Долгопрудный, [surovtseva.vp@phystech.edu](mailto:surovtseva.vp@phystech.edu)

<sup>2</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Россия, г. Фрязино

Оптическая когерентная томография (ОКТ) является одним из наиболее информативных методов трехмерной визуализации биологических объектов. ОКТ основано на анализе интерференции широкополосного излучения, отраженного от образца и опорного плеча [1], и позволяет получать координатную зависимость коэффициентов отражения и рассеяния в образце с разрешением 1–15 мкм. Уровень отраженного от образца оптического сигнала может ослабевать за счет актов рассеяния и поглощения более чем на 100 дБ для слоев толщиной 1 мм. В данной работе предлагается оригинальная схема волоконного ОКТ, включающая в себя усилитель отраженного оптического сигнала. Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис., а.

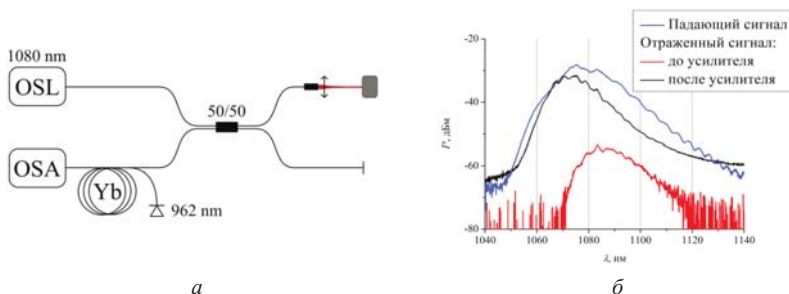


Рис. 1. (а) Блок-схема экспериментальной установки (OSL – суперлюминесцентный источник излучения, OSA – оптический спектроанализатор, Yb – иттербиевый усилитель, серым цветом – образец); (б) спектры регистрируемого сигнала

Схема усилителя и суперлюминесцентного источника выполнены на одинаковом иттербиевом активном волокне, что позволяет усиливать сигнал во всем спектральном диапазоне источника. На рис., б представлены спектры излучения источника, а также отраженного от опорного плеча в отсутствии образца до и после усилителя. Было получено усиление отраженного сигнала более чем на 20 дБ во всем рабочем спектральном диапазоне источника.

#### Литература

1. A.F. Fercher, W. Drexler, C.K. Hitzenberger, T. Lasser, *Rep. Prog. Phys.*, 66(2), 239–303 (2003).

## ГИБРИДНЫЕ НЕОРГАНО-ОРГАНИЧЕСКИЕ НАНОБИОКОМПОЗИТЫ КАК ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ

Б. Г. Сухов<sup>1</sup>, Б. А. Трофимов<sup>2</sup>, D. Regdel<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, Россия, г. Новосибирск, [boris\\_sukhov@mail.ru](mailto:boris_sukhov@mail.ru)

<sup>2</sup>Иркутский институт химии им. А. Е. Фаворского СО РАН, Россия, г. Иркутск

<sup>3</sup>Institute of Chemistry and Chemical Technology MAS, Mongolia, Ulaanbaatar

Разработана [1] и развивается методология получения водорастворимых, агрегативно высокоустойчивых, биосовместимых наноконпозитов, представляющих собой инкапсулированные в макромолекулы полимеров наночастицы нульвалентных металлов, халькогенов, металлохалькогенидов, других химических элементов и их соединений, а также органических веществ [2–14].

В докладе будет обсуждаться синтез, строение, физико-химические, биологические свойства новых нанобиоконпозитов и их перспективные

области применения в качестве магнитных, оптических, каталитических материалов, а также средств параллельной многоканальной терапии и диагностики (тераностики).

*Работа выполнена при финансовой поддержке РЦНИ (грант № 20-53-44002\_Монг\_a).*

### Литература

1. Б.А. Трофимов, Б.Г. Сухов, Г.П. Александрова, С.А. Медведева, Л.А. Грищенко, А.Г. Малькина, Л.П. Феоктистова, А.Н. Сапожников, В.И. Дубровина, Е.Ф. Мартынович, В.В. Тирский, А.Л. Семенов, *Доклады Академии наук*, 393(5), 634–635 (2003).
2. Я.А. Костыро, Т.В. Ганенко, С.А. Медведева, Б.Г. Сухов, Б.А. Трофимов. Способ получения сульфатированных производных арабиногалактана, обладающих антикоагулянтной и гипополидеммической активностью. Патент РФ № 2319707С1, кл. С07НЗ/02, С08В37/00. 2008.
3. Г.Ф. Мячина, С.А. Коржова, Т.Г. Ермакова, Т.В. Конькова, А.С. Поздняков, Б.Г. Сухов, Б.А. Трофимов, *Доклады Академии наук*, 427(6), 790–792 (2009).
4. Т.В. Ганенко, Я.А. Костыро, Б.Г. Сухов, Б.А. Трофимов, Т.В. Фадеева, С.А. Верещагина, Л.Б. Корякина. Нанокompозит серебра на основе сульфатированного арабиногалактана, обладающий антимикробной и антитромботической активностью, и способ его получения. Патент РФ № 2462254С2, кл. А61К31/737, А61Р 31/04. 2012.
5. E.R. Gasilova, G.N. Matveeva, G.P. Aleksandrova, B.G. Sukhov, V.A. Trofimov, *J. Phys. Chem. B*, 117(7), 2134–2141 (2013).
6. М.В. Лесничая, Г.П. Александрова, Г. Долмаа, А.Н. Сапожников, Б.Г. Сухов, Д. Рэгдэл, Б.А. Трофимов, *Доклады Академии наук*, 456(1), 56–59 (2014).
7. А.В. Папкина, А.И. Перфильева, М.А. Живетьев, Г.Б. Боровский, И.А. Граскова, М.В. Лесничая, И.В. Клименков, Б.Г. Сухов, Б.А. Трофимов, *Доклады Академии наук*, 461(2), 239–241 (2015).
8. И.А. Шурыгина, Л.В. Родионова, М.Г. Шурыгин, Б.Г. Сухов, С.В. Кузнецов, Л.Г. Попова, Н.Н. Дремина, *Изв. РАН Сер. физ.*, 79(2), 280–282 (2015).
9. M.V. Lesnichaya, B.G. Sukhov, G.P. Aleksandrova, E.R. Gasilova, T.I. Vakul'skaya, S.S. Khutsishvili, A.N. Sapozhnikov, I.V. Klimentov, V.A. Trofimov, *Carbohydr. Polym.*, 175, 18–26 (2017).
10. M.V. Lesnichaya, R. Shendrik, B.G. Sukhov, *J. Lumin.*, 211, 305–313 (2019).
11. G.P. Aleksandrova, M.V. Lesnichaya, G. Dolmaa, B.G. Sukhov, D. Regdel, *Environ. Res.*, 190, 109878 (2020).
12. M. Lesnichaya, E. Karpova, B. Sukhov, *Colloids Surf. B*, 197, 111381 (2021).
13. A.I. Perfilava, I.A. Graskova, B.G. Sukhov, K.V. Krutovsky, *Agronomy*, 12(6), 1281 (2022).
14. K.A. Abzaeva, B.G. Sukhov, S.S. Khutsishvili, E.B. Tarabukina, L.E. Zelenkov, A.V. Nevazhina, T.V. Fadeeva, *Int. J. Mol. Sci.*, 23(18), 10963 (2022).

## ФЕРМЕНТОКАТАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕГО ПОЛИПИРРОЛА

Т. В. Конькова, Б. Г. Сухов

*Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН,  
Россия, г. Новосибирск, [boris\\_sukhov@mail.ru](mailto:boris_sukhov@mail.ru)*

Разработана [1] и развивается методология ферментативной окислительной полимеризации пиррола с получением электропроводящих полипирролов в присутствии допантов. Получающиеся полимерные электропроводящие материалы с иммобилизованными в своей структуре ферментами являются многоцелевыми электрокатализаторами, например, высокоспецифическими электрохимическими сенсорами, а также свободной от металлов альтернативой композитным электропроводящим платиносодержащим окислительно-восстановительным катализаторам топливных элементов.

### Литература

1. Y.N. Kupriyanovich, B.G. Sukhov, S.A. Medvedeva, A.I. Mikhaleva, T.I. Vakul'skaya, G.F. Myachina, B.A. Trofimov, *Mendeleev Commun.*, 18(1), 56–58 (2008).

## БОР-, ГАДОЛИНИЙ-СОДЕРЖАЩИЕ НАНОБИОКОМПОЗИТЫ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ТЕРАНОСТИКИ

Т. В. Конькова<sup>1</sup>, Н. В. Клушина<sup>1</sup>, И. Д. Евсеев<sup>1,2</sup>, Б. Г. Сухов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского  
СО РАН, Россия, г. Новосибирск, [boris\\_sukhov@mail.ru](mailto:boris_sukhov@mail.ru)*

<sup>2</sup>*Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,  
Россия, г. Новосибирск*

Развивается методология синтеза биосовместимых гибридных неоргано-органических нанобиокомпозигов, представляющих собой различные многоэлементные неорганические наночастицы (с комплексом нейтронзахватных, магнитных, фотоактивных и других свойств), инкапсулированные в макромолекулы бионацеливающих полимеров [1–13]. Синтезирован нанобиокомпозит с комплексом магнитных и нейтронзахватных свойств. Этот композит представляет собой наночастицы бората гадолиния, инкапсулированные в макромолекулы арабиногалактана листовницы сибирской, которые могут проходить через гематоэнцефалический барьер. Таким образом, полученный нанокompозит является перспективным средством многоканальной тераностики (магниторезонансной томографии с контрастным усилением, нейтроностимулированной гамма-томографии, магнитной гипертермии, двухканальной бор-, гадолиниевой нейтронзахватной терапии), в том числе опухолей головного мозга.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РЦНИ (грант № 20-53-44002\_Монг\_а).*

### Литература

1. Б.А. Трофимов, Б.Г. Сухов, Г.П. Александрова, С.А. Медведева, Л.А. Грищенко, А.Г. Малькина, Л.П. Феоктистова, А.Н. Сапожников, В.И. Дубровина, Е.Ф. Мартынович, В.В. Тирский, А.Л. Семенов, *Доклады Академии наук*, 393(5), 634–635 (2003).
2. Я.А. Костыро, Т.В. Ганенко, С.А. Медведева, Б.Г. Сухов, Б.А. Трофимов. Способ получения сульфатированных производных арабиногалактана, обладающих антикоагулянтной и гиполипидемической активностью. Патент РФ № 2319707С1, кл. С07Н3/02, С08В37/00. 2008.
3. Г.Ф. Мячина, С.А. Коржова, Т.Г. Ермакова, Т.В. Конькова, А.С. Поздняков, Б.Г. Сухов, Б.А. Трофимов, *Доклады Академии наук*, 427(6), 790–792 (2009).
4. Т.В. Ганенко, Я.А. Костыро, Б.Г. Сухов, Б.А. Трофимов, Т.В. Фадеева, С.А. Верещагина, Л.Б. Корякина. Нанокompозит серебра на основе сульфатированного арабиногалактана, обладающий антимикробной и антитромботической активностью, и способ его получения. Патент РФ № 2462254С2, кл. А61К31/737, А61Р 31/04. 2012.
5. E.R. Gasilova, G.N. Matveeva, G.P. Aleksandrova, B.G. Sukhov, B.A. Trofimov, *J. Phys. Chem. B*, 117(7), 2134–2141 (2013).
6. М.В. Лесничая, Г.П. Александрова, Г. Долмаа, А.Н. Сапожников, Б.Г. Сухов, Д. Рэгдэл, Б.А. Трофимов, *Доклады Академии наук*, 456(1), 56–59 (2014).
7. А.В. Папкина, А.И. Перфильева, М.А. Живетьев, Г.Б. Боровский, И.А. Граскова, М.В. Лесничая, И.В. Клименков, Б.Г. Сухов, Б.А. Трофимов, *Доклады Академии наук*, 461(2), 239–241 (2015).
8. И.А. Шурыгина, Л.В. Родионова, М.Г. Шурыгин, Б.Г. Сухов, С.В. Кузнецов, Л.Г. Попова, Н.Н. Дремина, *Изв. РАН Сер. физ.*, 79(2), 280–282 (2015).
9. M.V. Lesnichaya, B.G. Sukhov, G.P. Aleksandrova, E.R. Gasilova, T.I. Vakul'skaya, S.S. Khutsishvili, A.N. Sapozhnikov, I.V. Klimentov, B.A. Trofimov, *Carbohydr. Polym.*, 175, 18–26 (2017).
10. M.V. Lesnichaya, R. Shendrik, B.G. Sukhov, *J. Lumin.*, 211, 305–313 (2019).
11. G.P. Aleksandrova, M.V. Lesnichaya, G. Dolmaa, B.G. Sukhov, D. Regdel, *Environ. Res.*, 190, 109878 (2020).
12. M. Lesnichaya, E. Karpova, B. Sukhov, *Colloids Surf. B*, 197, 111381 (2021).
13. K.A. Abzaeva, B.G. Sukhov, S.S. Khutsishvili, E.B. Tarabukina, L.E. Zelenkov, A.V. Nevazhina, T.V. Fadeeva, *Int. J. Mol. Sci.*, 23(18), 10963 (2022).

## ОБОБЩЕННЫЕ РАМСЕЕВСКИЕ МЕТОДЫ В ПРЕЦИЗИОННОЙ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ: ОТ АТОМНЫХ ЧАСОВ ДО ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ

А. В. Тайченачев, В. И. Юдин

*Институт лазерной физики СО РАН, Россия, г. Новосибирск, [taich.alex@gmail.com](mailto:taich.alex@gmail.com)  
Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,  
Россия, г. Новосибирск*

Оптические стандарты частоты (атомные часы) основаны на высокоточной лазерной спектроскопии изолированных квантовых систем и в настоящее время являются наиболее точными научными инструментами. Относительная стабильность и точность частоты порядка  $10^{-18}$  уже достигнуты, ближайшей целью является уровень  $10^{-19}$ . Измерения частот на таком уровне позволяют провести новые проверки квантовой электродинамики и космологических моделей, поиск дрейфа фундаментальных констант, а также создать новый тип хронометрической геодезии.

Для многих атомных и ионных систем, перспективных для создания высокоточных оптических стандартов частоты, ключевым ограничением являются сдвиги частоты за счет самого пробного поля, частота которого стабилизирована и является репером для атомных часов. В частности, для сверхузких переходов (например, для электрооктапольного и двухфотонного переходов) нерезонансный штарковский сдвиг может быть настолько велик, что достижение высокой точности и стабильности практически невозможно. Для магнитно-индуцированной спектроскопии сдвиги полей (штарковские и квадратичные зеемановские сдвиги) могут в конечном итоге ограничивать достижимые метрологические характеристики. Аналогичное ограничение существует и для атомных часов, основанных на прямом использовании «частотной гребенки» (прямая частотно-гребенчатая спектроскопия), из-за штарковских сдвигов, индуцированных огромным количеством нерезонансных лазерных мод. В дополнение к оптическим стандартам частоты проблема сдвига поля также является критической для атомных часов СВЧ диапазона, основанных на эффекте когерентного захвата населения (КПН).

За последнее десятилетие достигнут значительный прогресс в решении этих задач с использованием методов спектроскопии Рамсея. В отличие от непрерывно-волновой спектроскопии импульсная спектроскопия Рамсея имеет большое количество дополнительных и хорошо контролируемых параметров (таких как длительности импульсов Рамсея  $t_1$  и  $t_2$ , время свободного развития  $T$ , «фазовый композиция» импульсов Рамсея и др.). Манипулируя этими параметрами, можно решать различные спектроскопические задачи. Разработка рамсеевских схем подавления полевых сдвигов частоты в оптических стандартах частоты началась с работы Юдина с соавторами [1], где был предложен метод гипер-рамсеевской

спектроскопии с использованием так называемых композитных импульсов. Вскоре этот метод был успешно подтвержден экспериментально.

В данной лекции будет представлен обзор методов подавления полевых сдвигов в атомных часах с использованием различных обобщенных схем. Оказывается, некоторые методы настолько универсальны, что могут успешно применяться как в оптических часах, так и в радиочастотных часах на основе КПН-эффекта, а также в атомных интерферометрах.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-12-00182).*

### Литература

1. V.I. Yudin, A.V. Taichenachev, C.W. Oates, Z.W. Barber, N.D. Lemke, A.D. Ludlow, U. Sterr, Ch. Lisdat, F. Riehle, *Phys. Rev. A*, 82, 011804(R) (2010).

## СТАТИСТИКА ФОТОНОВ ЗАМЕДЛЕННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ОДИНОЧНЫХ СУБМИКРОННЫХ КРИСТАЛЛОВ ПЕРОВСКИТОВ МАРbI<sub>3</sub>

А. О. Тарасевич<sup>1,2</sup>, И. Ю. Еремчев<sup>3</sup>, М. А. Князева<sup>1</sup>, Дж. Ли<sup>4</sup>,  
А. В. Наумов<sup>2,3</sup>, И. Г. Щеблыкин<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», Россия, г. Москва

<sup>2</sup>Московский педагогический государственный университет,  
Россия, г. Москва, [ao.tarasevich@gmail.com](mailto:ao.tarasevich@gmail.com)

<sup>3</sup>Институт спектроскопии РАН, Россия, г. Троицк

<sup>4</sup>Lund University, Sweden, Lund

В данной работе произведено детальное исследование статистики фотонов люминесценции одиночных субмикронных кристаллов металлоорганических перовскитов МАРbI<sub>3</sub> методом коррелированного по времени счета фотонов при импульсном возбуждении в схеме Хэнбери Брауна и Твисса [1]. Расчет кросскорреляционных функций второго порядка произвдился для выборок фотонов, принадлежащих состояниям системы с определенным квантовым выходом, а также для фотонов, отстающих на определенное время  $T_D$  от возбуждающего лазерного импульса ( $\tau_i > T_D$ , где  $\tau_i$  – относительное время прихода фотона). Было показано, что статистика фотонов меняется по мере увеличения  $T_D$  от 0 (учитываются все фотоны, основной вклад вносит быстрая фотолюминесценция, связанная с прямой рекомбинацией зарядов) до  $T_{rep}$  (увеличивается парциальный вклад фотонов замедленной люминесценции,  $T_{rep}$  – период повторения лазера) от полностью пуассоновской, до суб-пуассоновской. Данный эффект можно объяснить наличием внутри запрещенной зоны малого количества неглубоких дефектных уровней, способных захватывать носители заряда и высвобождать обратно в зону и приводящих, таким образом, к замед-

ленной люминесценции. Степень суб-пуассоновости в таком случае определяется количеством таких ловушек. Таким образом, данный метод может быть использован для определения концентрации подобных неглубоких ловушечных состояний. В данной работе удалось измерить концентрации ловушек вплоть до  $10^{13}$  см<sup>-3</sup>.

*А. О. Т., И. Ю. Е., М. А. К. и А. В. Н. являются членами ведущей научной школы Российской Федерации «Опτικο-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (грант Президента РФ НШ-776.2022.1.2). Работа выполнена в рамках темы государственного задания Московского педагогического государственного университета (МПГУ) «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нанотехнологиях и фотонике» при поддержке Министерства просвещения Российской Федерации (AAAA-A20-120061890084-9).*

### Литература

1. I.Y. Eremchev, A.O. Tarasevich, M.A. Kniazeva, J. Li, A.V. Naumov, I.G. Scheblykin, *Nano Lett.*, 23(6), 2087–2093 (2023).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДЫ В МИНЕРАЛЬНОМ КВАРЦЕВОМ СЫРЬЕ МЕТОДОМ ИК-СПЕКТРОСКОПИИ

С. Ю. Теренин, М. Д. Зимин, А. П. Жабоедов,  
А. И. Непомнящих, Р. Ю. Шендрик

*Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН,  
Россия, г. Иркутск, [s\\_terenin@list.ru](mailto:s_terenin@list.ru)*

Высокоочищенный кварцевый концентрат используется во множестве отраслей, включая оптику, микроэлектронику, светотехнику, посуду специального назначения, высокотемпературная керамика и др.

Для определения концентрации воды в кварцевом сырье стандартно используется метод масс-спектрометрии. Метод заключается в ионизации атомов и молекул, входящих в состав пробы, и регистрации спектра масс образовавшихся ионов. Такой метод имеет достаточно большие затраты и требует наличие соответствующего оборудования.

Метод ИК-спектроскопии заключается в исследовании света, прошедшего сквозь пластину кварца. В результате картирования мы можем наблюдать концентрацию воды в определённых координатах пластины, как показано на рисунке.

Для сравнения приведены результаты исследования содержания концентрации воды в кварцитах месторождения Бурал-Сарьдаг. По результатам этого метода содержание воды составило от 39 до 155 мкг/г [1].



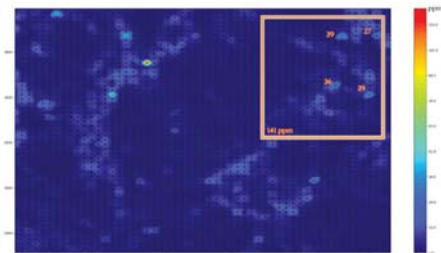


Рис. Содержание воды в пластине кварца методом ИК-спектроскопии

Метод ИК-спектроскопии показал схожие значения концентрации воды в пластинах кварца с методом масс-спектрометрии. Вследствие чего можно сделать вывод, что метод ИК-спектроскопии является достоверным и позволяет точно определить концентрацию воды в кварцевом сырье.

*Работа выполнена по госзаданию № 0284-2021-0004 «Материалы и технологии для разработки радиационных детекторов, люминофоров и оптических стекол», с использованием научного оборудования ЦКП "Изотопно-геохимических исследований" ИГХ СО РАН.*

#### Литература

1. А.И. Непомнящих, М.Г. Волкова, А.П. Жабоедов, А.М. Федоров, *Неорг. матер.*, 54(8), 850–853 (2018).

## ДАУН-КОНВЕРСИОННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ УЬ В КРИСТАЛЛАХ $\text{CaWO}_4$ , СИНТЕЗИРОВАННЫХ В РАЗЛИЧНЫХ ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

А. И. Титов<sup>1,2</sup>, К. А. Субботин<sup>1,2</sup>, Д. А. Лис<sup>1</sup>, Е. В. Чернова<sup>1</sup>, О. Н. Лис<sup>1</sup>,  
К. В. Кулешова<sup>1,2</sup>, Я. С. Диденко<sup>1,2</sup>, Ю. И. Зими́на<sup>1,2</sup>, Е. В. Жариков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН,  
Россия, г. Москва, [anatoly.titov.4@gmail.com](mailto:anatoly.titov.4@gmail.com)

<sup>2</sup>Российский химико-технологический университет  
им. Д. И. Менделеева, Россия, г. Москва

Монокристаллы шеелитоподобных вольфраматов и молибдатов, легированные ионами УЬ, перспективны для применения в фотовольтаике для повышения эффективности солнечных элементах на кристаллическом кремнии, благодаря процессу кооперативной даун-конверсии.

Процесс кооперативной даун-конверсии заключается в поглощении УФ излучения донорными центрами и последующей передаче энергии возбужденного состояния на удвоенное число акцепторов (возбужденное состояние  ${}^2F_{5/2}$  ионов  $\text{Yb}^{3+}$ ), которые излучают вторичные кванты света в районе 1 мкм. Однако природа донорных центров, вовлеченных в этот процесс, оставалась неизвестной. Ряд версий возможных природных до-

норных центров (центры окраски на кислородных или катионных вакансиях, а также частично восстановленные ионы молибдена/вольфрама и неконтролируемые примеси) были отвергнуты в работе [1]. Целью данного исследования была дополнительная проверка таких версий, как ионы  $\text{Yb}^{2+}$  и высоколежащие возбужденные состояния самих ионов  $\text{Yb}^{3+}$ .

С этой целью методом Чохральского на воздухе, в атмосфере азота и аргона были выращены монокристаллы  $\text{Yb}:\text{CaWO}_4$  и  $\text{Yb},\text{Nb}:\text{CaWO}_4$ . Часть выращенных кристаллов отжигали на воздухе, в атмосфере  $\text{CO}/\text{CO}_2$  или в форвакууме. Проведены сравнительные исследования даун-конверсионной люминесценции образцов в диапазоне 400–1050 нм при УФ-возбуждении.

Показано, что наилучшие свойства демонстрирует образец, выращенный в аргоне, а рост или отжиг кристаллов на воздухе, а также введение ниобия в состав кристалла  $\text{Yb}:\text{CaWO}_4$  подавляет даун-конверсионную люминесценцию  $\text{Yb}^{3+}$ . Сделан вывод, что основным донорным центром является ион  $\text{Yb}^{2+}$ . Другим (при этом менее эффективным) механизмом является внутрицентральной переход с переносом заряда в ионах  $\text{Yb}^{3+}$ .

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования, Госзадание FSSM-2020-0005.*

#### Литература

1. K.A. Subbotin, A.I. Titov, D.A. Lis, E. Sani, V.A. Simonov, O.K. Alimov, E.V. Zharikov, I.A. Shcherbakov, *Phys. Status Solidi A*, 217, 1900659 (2020).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛЮМИНОФОРОВ 3-(1,3-БЕНЗОТИАЗОЛ-2-ИЛ)-4- ГИДРОКСИБЕНЗОЛСУЛЬФОКИСЛОТЫ

Ф. Н. Томили<sup>1,2</sup>, А. В. Рогова<sup>2</sup>, Е. В. Парфёнова<sup>2</sup>,  
Н. В. Слюсаренко<sup>2</sup>, Е. А. Слюсарева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН – обособленное подразделение  
ФИЦ КНЦ СО РАН, Россия, г. Красноярск

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет,  
Россия, г. Красноярск, [felixnt@gmail.com](mailto:felixnt@gmail.com)

Различные сенсоры и средства визуализации на основе флуоресценции используются в биологии, физиологии, фармакологии и экологии для селективного обнаружения биологически и экологически объектов. Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в этой области, всё ещё остается ряд проблем, включая простоту использования, селективность и чувствительность. Люминофоры с аномальным стоксовым сдвигом на основе 3-(1,3-бензотиазол-2-ил)-4-гидроксibenзолсульфокислоты, способны давать яркое свечение в видимой области спектра [1]. Данные соединения

могут использоваться в качестве флуоресцентных зондов, конверторов солнечной энергии и спектральных преобразователей.

Теоретическое исследование спектральных характеристик люминофоров показывает, что аномально большой Stokes сдвиг ( $14\ 200\text{ см}^{-1}$ ) происходит в результате внутримолекулярного переноса протона в возбуждённом состоянии. Квантовохимические расчёты проводились методом функционала плотности с помощью B3LYP функционала в базисе *aug-cc-pVDZ*. Проведена оптимизация геометрии нескольких таутомерных форм люминофоров в различных растворителях в основном и возбуждённом состоянии, рассчитаны спектральные характеристики с помощью TD-DFT метода в рамках сольватационной модели. Расчёты выполнены в программе GAMESS.

Выявлены спектральные изменения 3-(1,3-бензотиазол-2-ил)-4-[(2-сульфобензоил)амино]бензолсульфокислоты, которые происходят за счёт внутримолекулярных взаимодействий с донорной ( $-\text{NH}_2$ ) группой. Таким образом, в возбуждённом состоянии происходит таутомерный переход из энольной формы в кетоформу.

#### Литература

1. Е.А. Бирген, Б.М. Болотин, М.Л. Кукушкина, Е.В. Яковлева. Бесцветные, растворимые в воде органические люминофоры. Патент РФ № 2287007С1, кл. C09K11/06, C07D265/14, C07D277/66. 2006.

## ТРАНСФОРМАЦИЯ СПЕКТРОВ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ АПКОНВЕРТИРУЮЩИХ НАНОЧАСТИЦ ФАНТОМАМИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ

Е. М. Трифанова<sup>1</sup>, М. Е. Николаева<sup>2</sup>, А. П. Свиридов<sup>1</sup>, В. К. Попов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт фотонных технологий, федеральный научно-исследовательский центр  
“Кристаллография и фотоника” РАН, Россия, г. Троицк, [katikin@mail.ru](mailto:katikin@mail.ru)

<sup>2</sup>Московский педагогический государственный университет, Россия, г. Москва

Фантомы биологических тканей используются для имитации свойств последних в лабораторных условиях. Для их изготовления часто применяются материалы природного и синтетического происхождения, в том числе и различные гидрогели. Из-за сложной иерархической структуры живых биотканей такие фантомы, как правило, моделируют какое-нибудь одно конкретное свойство, например их оптические характеристики.

Сегодня апконвертирующие наночастицы (НЧ) активно используются для визуализации биотканей и изучения происходящих с ними процессов как в *in vitro*, так и в *in vivo* исследованиях в реальном масштабе времени. НЧ обладают уникальными фотолюминесцентными свойствами и являются одними из перспективных компонентов элементной базы современной неинвазивной оптической диагностики.

В нашей работе приведены НЧ типа  $\beta$ - $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}:\text{Er}^{3+}/\text{NaYF}_4$  со структурой «ядро/оболочка», эффективно преобразующих излучение ближнего ИК диапазона в видимую область спектра, и характеристика их физико-химических свойств. Разработан процесс инкапсуляции НЧ в алифатические полиэферы с последующим формированием из них биорезорбируемых полилактогликолидных матриц методом антисольвентной 3D-печати. Изготовлены два типа фантомов биотканей на основе агарозы, ультрапастеризованного коровьего молока и меланина, а также определены коэффициенты поглощения и рассеяния ими излучения видимого и ближнего ИК диапазонов. Исследованы трансформации спектров фотолюминесценции синтезированных НЧ при прохождении излучения сквозь эти фантомы и реализована контрастная визуализация полиэфирных матриц, размещенных в них на различных глубинах. Определены границы применимости разработанных структур для прижизненной визуализации биотканей в реальном масштабе времени.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части синтеза наноразмерных апконвертирующих фосфоров и изготовления фантомов биологических тканей, и гранта РФФИ (проект № 20-32-90218\_Аспиранты) в части характеристики и визуализации фотолюминесцентных матриц.*

## **НОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ НА ОСНОВЕ БЕНЗОТИЕНОАЦЕНОВ: ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И КВАНТОВЫЙ ВЫХОД ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ**

К. Е. Трофимова<sup>1</sup>, А. В. Ищенко<sup>1</sup>, Р. А. Иргашев<sup>2</sup>, И. А. Вайнштейн<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НОЦ «Наноматериалы и нанотехнологии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,

Россия, г. Екатеринбург, [k.e.trofimova@urfu.ru](mailto:k.e.trofimova@urfu.ru)

<sup>2</sup>Институт органического синтеза им. Я. И. Постовского УрО РАН, Россия, г. Екатеринбург

В настоящий момент известно множество исследований, посвящённых изучению оптических и электрических свойств новых соединений на основе тиофена. Эти соединения обладают  $\pi$ -сопряженной молекулярной структурой, что может способствовать эффективному переносу зарядов внутри молекулы и положительно сказываться на их оптических свойствах. Ранее полученные результаты [1; 2] показывают, что эти соединения могут быть потенциально использованы в различных оптоэлектронных устройствах, таких как OLED, OFET, солнечные ячейки и др. [3].

В данной работе представлены результаты исследования оптических и электрических свойств полупроводниковых органических веществ на основе бензо[b]тиено[2,3-d]тиофенов (БТТ) с оксиметильными, мети-

ламинной и бензолной функциональными группами (ВТТ-ОСН<sub>3</sub>, ВТТ-ОСН<sub>2</sub>Н<sub>5</sub>, ВТТ-2ОСН<sub>2</sub>, В-ВТТ-2ОСН<sub>2</sub>, ВТТ-Н<sub>2</sub>СН<sub>3</sub>). Квантовый выход измерялся в порошкообразном виде, а исследование электрических свойств осуществлялось для тонкопленочных структур ВТТ-Н<sub>2</sub>СН<sub>3</sub>, ВТТ-2ОСН<sub>2</sub>.

Электрические характеристики соединений определены методом линейно возрастающего напряжения в структурах металл-диэлектрик-полупроводник (MIS-CELIV). Измерен абсолютный квантовый выход люминесценции с использованием интегрирующей сферы собственной разработки, адаптированной под люминесцентный спектрофотометр Pegin Elmer LS-55.

Подвижность носителей заряда, определенная методом MIS-CELIV, для исследуемых структур находится в диапазоне  $1,86 \cdot 10^{-6} - 1,12 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/В·сек. Квантовый выход люминесценции в диапазоне 0,4–1,5 %. В докладе обсуждается связь электрических и оптических характеристик исследуемых веществ с их химическим составом и структурными особенностями. Выделен ряд перспективных материалов с высоким квантовым выходом фотолюминесценции для проектирования устройств органической электроники.

#### Литература

1. К.Е. Трофимова, А.В. Ищенко, Ю.Э. Устюжанина, Р.А. Иргашев, И.А. Вайнштейн, Сборник тезисов докладов IX Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации» ФТИ-2022, посвященной 100-летию со дня рождения профессора С.П. Рапопина, (Екатеринбург, 2022). С. 362–363.
2. К.Е. Trofimova, A.V. Ishchenko, R.A. Irgashev, I.A. Weinstein, Сборник тезисов докладов Всероссийской научной конференции с международным участием «Енисейская Фотоника – 2022» (Красноярск, 2022). Т. 1, С. 122.
3. M. Berggren, D. Nilsson, N.D. Robinson, *Nat. Mater.*, 6, 3–5 (2007).

## СТИМУЛИРОВАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ HgCdTe В ДИАПАЗОНЕ 3–5 мкм

М. А. Фадеев, А. А. Дубинов, А. А. Разова, А. А. Янцер, В. В. Уточкин,  
В. В. Румянцев, В. Я. Алешкин, Д. В. Шенгуров, Е. Е. Морозова,  
Н. Н. Михайлов, С. А. Дворецкий, В. И. Гавриленко, С. В. Морозов

*Институт физики микроструктур РАН – филиал ФИЦ Институт  
прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН, Россия,  
Нижегородская обл., д. Афонино, [fadeev@ipmras.ru](mailto:fadeev@ipmras.ru)*

Для мониторинга окружающей среды требуются полупроводниковые лазеры среднего инфракрасного (ИК) диапазона, так как в этом диапазоне лежит большое число линий поглощения газов-парниковых [1]. Лучшими характеристиками среди полупроводниковых источников среднего ИК диапазона обладают квантово-каскадные лазеры (ККЛ), способные работать в непрерывном режиме при комнатной температуре [2]. Од-

нако из-за технологических сложностей роста ККЛ активно разрабатываются альтернативные излучатели диапазона 3–5 мкм. Основным препятствием для разработки межзонных лазеров среднего ИК-диапазона является оже-рекомбинация, которая приводит к резкому росту порога лазерной генерации с температурой. В гетероструктурах с квантовыми ямами (КЯ) на основе CdHgTe процессы, которые являются аналогом объемной оже-рекомбинация, подавлены, но за счет чего уже в первой работе по исследованию стимулированного излучения в таких структурах удалось достичь температуры генерации более 200 К [3]. Были спроектированы структуры, оптимизированные с точки зрения состава КЯ, количества КЯ в активной области и состава барьеров. На данный момент стимулированное излучение получено при температуре 273 К на длине волны  $\sim 3,5$  мкм.

На основе исследованных структур были изготовлены полосковые и дисковые резонаторы и получена лазерная генерация в температурном диапазоне от 8 до 260 К. Обнаружено, что изготовление дисковых резонаторов приводит к повышению температуры генерации, в то время как полосковые резонаторы наоборот приводят к уменьшению критической температуры. Мы связываем это с возникновением дополнительного канала поверхностной безызлучательной рекомбинации.

*Поддержано НЦМУ «Центр фотоники», при финансировании Министерством науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2022-316.*

### **Литература**

1. I.E. Gordon, L.S. Rothman, C. Hill et al., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 203, 3–69 (2017).
2. N. Bandyopadhyay, Y. Bai, S. Tsao, S. Nida, S. Slivken, M. Razeghi, *Appl. Phys. Lett.*, 101(24), 241110 (2012).
3. M.A. Fadeev, V.V. Rummyantsev, A.M. Kadykov, A.A. Dubinov, A.V. Antonov, K.E. Kudryavtsev, S.A. Dvoretiskii, N.N. Mikhailov, V.I. Gavrilenko, S.V. Morozov, *Opt. Express*, 26(10), 12755–12760 (2018).

## ОПТИЧЕСКАЯ ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ МИКРОВОЛНОВОЙ ПЛАЗМЫ В СМЕСЯХ $\text{H}_2$ - $\text{CH}_4$ - $\text{GeH}_4$ В ПРОЦЕССЕ ЛЕГИРОВАНИЯ АЛМАЗА ГЕРМАНИЕМ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ $\text{GeV}$

И. А. Федорова, В. Ю. Юров, А. П. Большаков,  
А. К. Мартыанов, В. Г. Ральченко

*Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН,  
Россия, г. Москва, [vil2276@gmail.com](mailto:vil2276@gmail.com)*

Центр окраски германий-вакансия ( $\text{GeV}$ ) в алмазе, обладающий узкополосным излучением фотолюминесценции (ФЛ) в оранжевом диапазоне спектра, интересен как источник одиночных фотонов для квантово-оптических технологий, термометрии, оптических биомаркеров [1], поэтому разработка методов управляемого легирования алмаза германием имеет большое значение для этих применений. Мы реализовали осаждение легированных эпитаксиальных алмазных слоев в СВЧ-плазмохимическом реакторе (АРДИС-100, ООО «Оптосистемы») при добавлении газообразного германа  $\text{GeH}_4$  в плазму  $\text{H}_2$ - $\text{CH}_4$  [1]. Подложками служили монокристалльные пластины НРПТ алмаза с ориентацией (111). Диагностику плазмы проводили с помощью оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС) [2] на спектрометре M833 (Solar Laser System, спектральное разрешение 0,01 нм).

Исследована динамика интенсивности основных линий ( $\text{Ge}$ ,  $\text{H}_\beta$  и  $\text{C}_2$ ) в спектрах ОЭ при вариации концентрации  $\text{GeH}_4$  в смеси (до 0,65 %), отражающая сложную химию в плазме. Найдено, что газовая температура  $T_g$  при добавке германа монотонно снижается от 2980 до 2690 К. Также из соотношения интенсивностей линий серии Бальмера оценена электронная температура  $T_e$ . Получены результаты по измерению спектров фотолюминесценции выращенных слоев. Показано, что при определенных условиях формируются центры  $\text{GeV}$ , излучающие на длине волны 602 нм.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ, грант № 21-12-00403.*

### Литература

1. I.Y. Eremchev, A.Y. Neliubov, K.N. Boldyrev, V.G. Ralchenko, V.S. Sedov, L. Kador, A.V. Naumov, *J. Phys. Chem. C*, 125(32), 17774–17785 (2021).
2. V.Y. Yurov, V.G. Ralchenko, A.K. Martyanov, I.A. Antonova, V.S. Sedov, A.A. khomich, V.V. Voronov, S.S. Savin, M.Y. Shevchenko, A.P. Bolshakov, *J. Vac. Sci. Technol A*, 39(2), 023002 (2021).

## ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ФЛУКТУАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ

П. А. Французов

*Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН,  
Россия, г. Новосибирск, [frantsuzov@kinetics.nsc.ru](mailto:frantsuzov@kinetics.nsc.ru)*

Интенсивность фотолюминесценции отдельных наночастиц, таких как коллоидные полупроводниковые квантовые точки, наностержни, перовскитные нанокристаллы и др., находящейся под непрерывным облучением внешним источником света, меняется во времени, флуктуирует. Причем, что самое интересное, эти флуктуации не имеют масштабов времени. То есть можно наблюдать флуктуации на временах порядка миллисекунд, секунд, тысяч секунд, даже иногда часов. Несмотря на то, что изучением этого явления (мерцания) исследователи занимаются уже более 20 лет и на эту тему опубликованы тысячи статей, нельзя утверждать, что мы имеем полную научную картину того, как именно происходит мерцание.

Мы рассмотрим современное состояние этой проблемы, ключевые экспериментальные результаты, обсудим предложенные в литературе физические механизмы и теоретические модели мерцания.

## СПЕКТРОСКОПИЯ ЦЕНТРОВ, ИНДУЦИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В КРИСТАЛЛЕ $KCl-Tl_2SO_4$

А. С. Фролова<sup>1</sup>, А. Л. Ракевич<sup>2</sup>, Е. Ф. Мартынович<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Иркутский государственный университет,  
Россия, г. Иркутск, [frizska888@mail.ru](mailto:frizska888@mail.ru)*

<sup>2</sup>*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН,  
Россия, г. Иркутск, [femto@bk.ru](mailto:femto@bk.ru)*

Исследуемый кристалл является новым нелинейным фотографическим материалом с люминесцентной визуализацией скрытого изображения. На рисунке кривой 1 показан спектр фотолюминесценции центров, наведенных в кристалле интенсивным лазерным излучением. Спектр содержит две полосы излучения. Их наличие можно интерпретировать на основе одной из схем, показанных в нижней части рисунка. В соответствии со схемой 1, величины постоянных времени затухания в обеих полосах 440 нм и 640 нм должны быть одинаковыми. Это не соответствует экспериментальным данным, поэтому схема 1 исключается.

В соответствии со схемой 2 отношение интенсивностей полос 440 нм и 640 нм должно быть постоянным при фиксированной температуре. Для проверки выполнения этого условия был проведен эксперимент по фотохимическому преобразованию центров в кристалле, который показал, что отношение интенсивностей полос изменилось (кр. 2). Поэтому схема 2 тоже исключается.



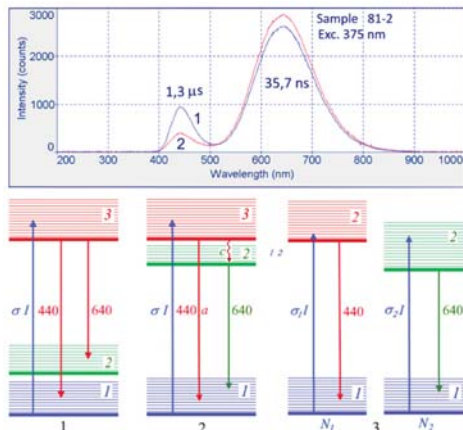


Рис. Спектры, постоянные времени затухания в спектральных полосах и возможные схемы уровней и квантовых переходов в центрах люминесценции

Для схемы 3 отношение интенсивностей полос равно отношению:  $\sigma_1 N_1 / \sigma_2 N_2$ . Здесь  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – сечения поглощения двух центров люминесценции, показанных на схеме 3, а  $N_1$  и  $N_2$  – концентрации этих центров. В итоге, мы приходим к заключению, что две исследуемые полосы люминесценции обусловлены квантовыми переходами в двух различных центрах люминесценции, которые имеют частично перекрывающиеся спектры поглощения.

*Работа поддержана научным проектом 0243-2021-0004 в рамках плана фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 г.*

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОГЛОЩЕНИЕ СМЕШАННЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ ПЕРОВСКИТОВ $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{I}_{1-x})_3$ В БОРОГЕРМАНАТНОЙ МАТРИЦЕ

Р. Д. Харисова, А. Н. Бабкина, К. С. Зырянова

*Национальный исследовательский университет ИТМО,  
Россия, г. Санкт-Петербург, [harisovarufina@gmail.com](mailto:harisovarufina@gmail.com)*

В данной работе было исследовано влияние температуры на поглощение смешанных бромидно-йодидных нанокристаллов перовскитов  $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{I}_{1-x})_3$  в борогерманатной матрице.

Была синтезирована серия стекол системы  $23,59 \text{ B}_2\text{O}_3 - 38,09 \text{ GeO}_2 - 6,41 \text{ Na}_2\text{O} - 5,03 \text{ ZnO} - 1,38 \text{ P}_2\text{O}_5 - 2,85 \text{ TiO}_2 - 4,99 \text{ K}_2\text{O} - 5,41 \text{ Cs}_2\text{O} - 2,26 \text{ PbO} - 9,98x \text{ Br} - 9,98(1-x) \text{ I}$  мол.%. Стекло синтезировалось в воздушной атмосфере при температуре  $950^\circ\text{C}$  в течение 30 мин. Нанокристаллы перовскитов  $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{I}_{1-x})_3$  выделялись в матрице стекла при отжиге от  $470^\circ\text{C}$ . Температура стеклования полученных стекол около  $450^\circ\text{C}$ .

Влияние нагрева и охлаждения на оптическую плотность стеклокерамик исследовалось в специальной установке, состоящей из печи с окнами из кварцевого стекла, источника широкого спектра, спектрометра и контроллера температуры. При обработке измерений прослеживалось изменение оптической плотности различных образцов на длинах волн, соответствующих экситонным максимумам поглощения. Во время эксперимента образцы стеклокерамик с перовскитами нагревались от комнатной температуры до температуры, при которой поглощение нанокристаллов исчезало (370–500 °С). После достижения такой температуры стеклокерамики охлаждались до комнатной температуры; скорость нагрева и охлаждения образцов поддерживалась равной  $2 \pm 0,5$  °С.

На кривых зависимости оптической плотности от температуры наблюдается гистерезис – при нагреве быстрый спад поглощения (плавление нанокристаллов) проходил при больших температурах, чем резкий рост поглощения при охлаждении (кристаллизация). Смешанные нанокристаллы обладают меньшими температурами плавления и кристаллизации, чем чистые, а в целом эти характеристические температуры оказались ниже, чем температуры плавления чистых бромидных и чистых йодидных монокристаллов перовскитов. Кроме того, было замечено, что форма кривых зависимости оптической плотности от температуры не изменяется при изменении длины волны наблюдения в пределах образца одного состава, что свидетельствует о выделении одной кристаллической фазы.

## МЕТОДЫ ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКИ В ИССЛЕДОВАНИИ ЗАПРЕЩЕННЫХ В СПОРТЕ ФАРМПРЕПАРАТОВ

М. С. Хещева<sup>1</sup>, К. Н. Болдырев<sup>2</sup>, К. Р. Каримуллин<sup>1,2,3</sup>, Е. П. Кожина<sup>1,2</sup>,  
С. А. Бедин<sup>1,2</sup>, А. Р. Калимуллина<sup>1</sup>, Д. Р. Курмалеев<sup>1</sup>, А. В. Наумов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский педагогический государственный университет,  
Россия, г. Москва, [ms.khetseva@mpgu.su](mailto:ms.khetseva@mpgu.su)

<sup>2</sup>Институт спектроскопии РАН, Россия, г. Троицк

<sup>3</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Россия, г. Москва

Рассмотрены подходы к спектральному анализу фармпрепаратов различного химического строения методами колебательной спектроскопии высокого разрешения, а также люминесцентной спектроскопии. В исследовании использовались метод комбинационного рассеяния света, инфракрасная спектроскопия и люминесцентная микроскопия. Среди фармпрепаратов, рассматриваемых в эксперименте – мельдоний, триметазиндин, фурсемид – широко известные лекарственные средства, интерес к которым резко возрос после допинговых скандалов на международных спортивных соревнованиях. Эти вещества относятся к разным категориям допинговых средств, характеризуются различным химическим составом и пространственной структурой молекул. Исследование таких веществ ме-

тодами оптической спектроскопии, а также обработка эталонных условий пробоподготовки и проведения измерений, важны и актуальны для разработки новых технологий оптико-спектрального анализа для поиска и идентификации веществ, в том числе в целях допингового контроля.

В измеренных ИК-спектрах веществ, содержащих мельдоний выделены характеристические спектральные полосы в областях  $600\text{--}1200\text{ см}^{-1}$ ,  $1350\text{--}1600\text{ см}^{-1}$ ,  $\sim 2900\text{ см}^{-1}$  и  $3400\text{--}3500\text{ см}^{-1}$ , которые соответствуют данным, полученным в других исследованиях:  $1395\text{ см}^{-1}$ ,  $1585\text{ см}^{-1}$ ,  $3422\text{ см}^{-1}$  [1]. В эксперименте по анализу порошковых капсульных смесей (не очищенных от вспомогательных примесей, таких как крахмал, антислеживающие агенты и прочее) наблюдаются заметные пики в области от  $950$  до  $1250\text{ см}^{-1}$ , что свидетельствует о наличии в исследуемом веществе различных примесей. Характеристические линии мельдония в данной области спектра отсутствуют, что соответствует спектру чистого активного вещества. Для сравнения был рассмотрен ИК-спектр таблетизированного фуросемида, в качестве вспомогательных примесей в котором содержатся картофельный крахмал, стеарат магния, коллоидный диоксид кремния, используемые и в препарате с мельдонием.

При измерениях методом комбинационного рассеяния света в спектрах образцов с мельдонием выделены характеристические полосы около  $744$ ,  $876$ ,  $944$ ,  $1410\text{ см}^{-1}$ , что также хорошо соотносится с результатами других исследований. Длины волн спектральных полос в экспериментальных спектрах КР соответствуют расчетным данным, полученным с использованием программного пакета ORCA 5 [2].

Дополнительно для изучения водных растворов с различной концентрацией мельдония, фуросемида и триметазида были выполнены тестовые измерения спектров гигантского комбинационного рассеяния с использованием SERS-подложек – наноструктурированных структур на основе массивов серебряных нанопроволок и дендритных структур на металлической подложке. Полученные результаты могут быть использованы в дальнейших исследованиях для разработки спектроскопических методов характеристики веществ, содержащих как алифатические (мельдоний), так и гетероциклические (фуросемид, триметазидин) соединения.

*Авторы доклада являются членами ведущей научной школы РФ «Оптико-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (проект НШ-776.2022.1.2). Исследование выполнено в рамках темы Государственного задания МПГУ «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нанотехнологиях и фотонике» при поддержке Министерства Просвещения РФ (AAAA-A20-120061890084-9).*

#### Литература

1. L.D. Rusu, I. Bratu, C. Măruțoiu, Z. Moldovan, M. Rada, *Anal. Lett.*, 54(1-2), 233–241 (2021).
2. М.С. Хецева, Е.П. Кожина, С.А. Бедин, А.В. Наумов, Сборник научных трудов X Международной школы-конференции молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики» (Минск, 2022). С. 165–167.

## ЭКСИМЕРНАЯ ЗАМЕДЛЕННАЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ $\beta$ -ДИКЕТОНАТОВ ДИФТОРИДА БОРА В ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕ

А. А. Хребтов<sup>1,2</sup>, Е. В. Федоренко<sup>2</sup>, А. Г. Мирочник<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Дальневосточный федеральный университет, Россия, г. Владивосток,  
[xrebtov\\_aa@dvfu.ru](mailto:xrebtov_aa@dvfu.ru)

<sup>2</sup>Институт химии ДВО РАН, Россия, г. Владивосток

Полимерные люминесцентные композиции (ПЛК) на основе  $\beta$ -дикетонатов дифторида бора ( $\beta$ -ДДБ) характеризуются выдающимися спектральными свойствами и перспективны для практического применения в области хемо- [1] и механосенсорики [2], светотехники [3]. В данной работе описан эффект, связанный с формированием центров эксимерной замедленной флуоресценции (ЗФ) Р-типа в ПЛК на основе соединений класса  $\beta$ -ДДБ, а именно диарилметанатов и арилацетонатов дифторида бора. Данный эффект обусловлен термопластичными свойствами полимерной матрицы и способностью  $\beta$ -ДДБ формировать возбужденные комплексы (эксимеры). При облучении интенсивным возбуждающим излучением, например, лазером, ПЛК, полученных методом полива из раствора в виде пленок, наблюдается длительная эксимерная ЗФ с временем жизни до 1,5 с. Благодаря высоким коэффициентам молярной экстинкции  $\beta$ -ДДБ интенсивно поглощают возбуждающее излучение, в результате чего полимерная матрица подвергается локальному нагреву в месте облучения. Это приводит к увеличению свободного объема и повышению подвижности молекул  $\beta$ -ДДБ, что способствует фотоиндуцированному формированию эксимеров. Высокая жесткость матрицы препятствует тушению триплетных состояний  $\beta$ -ДДБ, что приводит к формированию центров эксимерной ЗФ. Сформированные центры ЗФ могут сохраняться в полимерной матрице в течение длительного времени. Это позволяет наносить на ПЛК рисунок, невидимый при естественном освещении, но видимый при облучении возбуждающим излучением. Данный эффект может быть использован для скрытой маркировки ценных объектов [4].

### Литература

1. S. Xu, R.E. Evans, T. Liu, G. Zhang, J.N. Demas, C.O. Trindle, C.L. Fraser, *Inorg. Chem.*, 52(7), 3597–3610 (2013).
2. L. Zhang, L.L. Ma, X. Wang, X.Y. Zhao, *J. Lumin.*, 214, 116560 (2019).
3. Е.Ю. Иштокина, А.А. Хребтов, Е.В. Федоренко, З.Н. Пузырьков, Л.А. Лим, А.Г. Мирочник, *Опт. и спектр.*, 130(8), 1288–1292 (2022).
4. А.А. Хребтов, Е.В. Федоренко, А.Г. Мирочник. Способ скрытой маркировки. Патент РФ № 2790680, кл. C09K11/06, C08K5/55. 2023.

## ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ АЛЮМОМАГНИЕВОЙ ШПИНЕЛИ $MgAl_2O_4:Mn$ , СИНТЕЗИРОВАННОЙ РАДИАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Н. Д. Чан, Е. Ф. Полисадова

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр-кт Ленина, 30, [nhandatran94@gmail.com](mailto:nhandatran94@gmail.com)*

Алюмомагниевою шпинель (АМШ) рассматривают как перспективный материал для создания люминофоров для светодиодов (СД), излучающих в «зеленой» и «красной» областях спектра [1]. Одним из перспективных методов для получения АМШ с различными типами активаторов является радиационный метод синтеза, с применением высокоэнергетического электронного пучка [2]. В данной работе исследовались образцы АМШ, активированной ионами марганца  $MgAl_2O_4:Mn$ , в виде керамики, синтезированной радиационным методом. Синтез осуществлялся из промышленных порошков  $MgO$  (ЧДА ГОСТ 4526-75, 99,9 %) и  $Al_2O_3$  (марки F800/10, F600 и F1200) различного гранулометрического состава, смешанных в стехиометрическом соотношении. Ионы марганца вводились в виде оксида  $Mn_2O_3$  в количестве 0,5 и 1 вес. %. Целью исследования является анализ влияния структуры порошка  $Al_2O_3$  и содержания оксида марганца в составе керамики АМШ на люминесцентные свойства образцов.

Для исследования фотолюминесценции (ФЛ) осуществлялись на спектрофлуориметре Cary Eclipse. Образцы керамик произвольной формы использовались для измерений. Состав керамик приведен в таблице.

Таблица

Состав шихты для синтеза  $MgAl_2O_4$

№ образца	Основные компоненты	Активатор
101	$MgO, Al_2O_3$ (F800/M10)	1 % $Mn_2O_3$
102	$MgO, Al_2O_3$ (F800/M10)	0,5 % $Mn_2O_3$
105	$MgO, Al_2O_3$ (F600)	1 % $Mn_2O_3$
106	$MgO, Al_2O_3$ (F600)	0,5 % $Mn_2O_3$
107	$MgO, Al_2O_3$ (F1200)	1 % $Mn_2O_3$
108	$MgO, Al_2O_3$ (F1200)	0,5 % $Mn_2O_3$

Результаты исследования показали, следующее. При возбуждении в области 450 нм, в спектрах люминесценции всех образцов наблюдаются полосы свечения с пиковой длиной волны в области 520 и 610 нм (рис.). Наличие двух полос в спектре ФЛ АМШ свидетельствует о том, что ион марганца встраивается в кристаллическую решетку шпинели в виде двухвалентного иона  $Mn^{2+}$ , и может занимать как тетраэдрическую позицию («зеленое» свечение), так октаэдрическую («красное свечение») [3; 4]. Наличие в кристалле анионных вакансий способствует такому перераспределению иона марганца в решетке. Вероятно, в условиях радиационного синтеза возможно образование таких вакансий. Соотношение между интенсивностью «зеленой» и «красной» полосами свечения варьируется от образца к образцу.

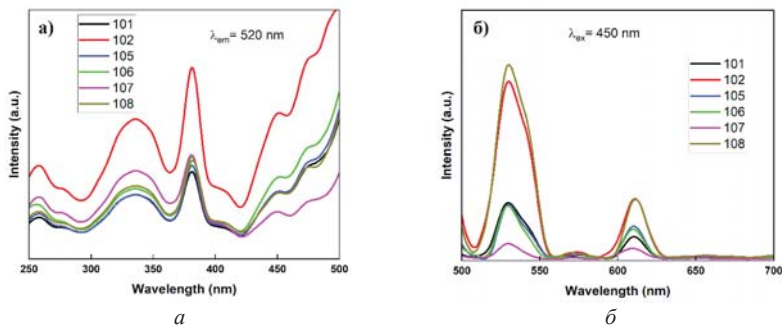


Рис. Спектры возбуждения (а) полосы люминесценции с  $\lambda_{em} = 520$  нм (б) и фотолюминесценция с  $\lambda_{ex} = 450$  нм образцов АМШ

Максимальная интенсивность ФЛ наблюдается в образцах 108 и 102, содержащих 0,5 % оксида марганца, при этом, образец 106 с такой же концентрацией активатора, показывает меньшую интенсивность, сравнимую с интенсивностью для образцов с концентрацией 1 %  $Mn_2O_3$ . Не выявлено прямой зависимости эффективности свечения от типа используемого для синтеза оксида алюминия, различающегося размером частиц в порошке.

По результатам исследований можно сделать вывод о перспективности использования АМШ  $MgAl_2O_4:Mn$  для СД, так как полосы возбуждения свечения  $Mn^{2+}$  хорошо совпадают с полосами излучения широко используемых УФ и «синих» чипов, путем оптимизации условий синтеза возможно варьировать соотношении излучении в зеленой и красной областях спектра.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-73-00108, <https://rscf.ru/project/23-73-00108/>.*

### Литература

1. Q. Sai, C. Xia, H. Rao, X. Xu, G. Zhou, P. Xu, *J. Lumin.*, 131(11), 2359–2364 (2011).
2. V. Lisitsyn, A. Tulegenova, E. Kaneva, D. Mussakhanov, B. Gritsenko, *Materials*, 16(3), 1057 (2023).
3. Д.Т. Свиридов, Р.К. Свиридова, Ю.Ф. Смирнов. Оптические спектры ионов переходных металлов в кристаллах. М.: Наука, 1976. 267 с.
4. A. Tomita, T. Sato, K. Tanaka, Y. Kawabe, M. Shirai, K. Tanaka, E. Hanamura, *J. Lumin.*, 109(1), 19–24 (2004).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ОДНОМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ СО СВЕРХРЕШЕТКАМИ

В. В. Чашин<sup>1</sup>, Е. И. Липатов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г. Томск, [lloodia@yandex.ru](mailto:lloodia@yandex.ru)

<sup>2</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, г. Томск

Одномерный фотонный кристалл представляет собой структуру с переменным чередованием показателя преломления в ней в одном направлении [1]. Основным преимуществом таких структур является возможность достижения практически стопроцентного отражения в интересующем диапазоне оптического спектра. При этом, создание дефекта в одном из слоев приводит к появлению разрешенных состояний в фотонной запрещенной зоне [2], что позволяет использовать такие структуры в качестве просветляющих покрытий.

В данной работе производился расчет одномерных фотонных кристаллов со сверхрешетками на основе оксидов металлов ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ) и на основе слоев чистого и примесного алмаза. Для расчета в представленной работе использовался метод конечных элементов, представленный расчетным пакетом COMSOL Multiphysics.

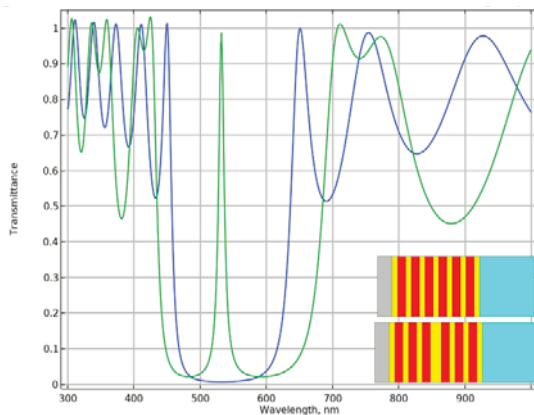


Рис. Расчетный спектр пропускания структуры без дефекта (синий)  
и с удвоением толщины центрального слоя (зеленый)

*Исследование было выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSWM-2020-0048.*

### Литература

1. T.F. Krauss, M. Richard, *Prog. Quantum. Electron.*, 23(2), 51–96 (1999).
2. А.В. Шабанов, М.А. Коршунов, Е.Р. Буханов, *Компьютерная оптика*, 41(5), 680–686 (2017).

## **ЭФФЕКТЫ МАГНИТНОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ (ИНТЕРФЕРЕНЦИИ) УРОВНЕЙ, ИНДУЦИРОВАННЫЕ ПОЛЕМ ВОЛНЫ ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ, В СПЕКТРАХ НАСЫЩЕННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ И МАГНИТНОГО СКАНИРОВАНИЯ В АТОМАХ С $\Lambda$ - И $V$ - ТИПОМ ПЕРЕХОДОВ**

А. А. Черненко

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,  
Россия, г. Новосибирск, [chernen@isp.nsc.ru](mailto:chernen@isp.nsc.ru)*

На основе аналитических и численных решений уравнений для матрицы плотности исследуются эффекты магнитной когерентности (интерференции) уровней в  $\Lambda$ - и  $V$ -типах переходов, индуцируемые полем линейно поляризованной ЭМ волны произвольной интенсивности, на населенности уровней переходов и спектры резонансов насыщенного поглощения при частотном и магнитном сканировании.

Показано, что эффект магнитной когерентности (интерференции) уровней может проявляться в спектрах резонансов насыщенного поглощения не только, как когерентный эффект через нелинейную поляризацию на рассматриваемых переходах [1-3], но и через эффект некогерентного насыщения населенностей уровней, внося значительный вклад и изменяя их населенности (до  $\sim 50\%$  от полевого вклада). Обнаружены различия в проявлении эффекта МК в населенностях уровней на открытых и закрытых переходах в  $V$ -схеме.

Установлено, что в спектрах резонансов насыщенного поглощения при магнитном сканировании вблизи нуля магнитного поля формируются узкие структуры – резонансы электромагнитно-индуцированной прозрачности (ЭИП). Исследованы зависимости параметров резонансов ЭИП от характеристик атомных переходов и интенсивности ЭМ волны. Выявлен вклад МК уровней переходов в форму этих резонансов. Анализируется возможность использования резонансов ЭИП для регистрации слабых магнитных полей.

### **Литература**

1. С.Г. Раутиан, Г.И. Смирнов, А.М. Шалагин. Нелинейные резонансы в спектрах атомов и молекул. Новосибирск: Наука, 1979. 310 с.
2. Э.Г. Сапрыкин, А.А. Черненко, А.М. Шалагин, *ЖЭТФ*, 150, 238–245 (2016).
3. Э.Г. Сапрыкин, А.А. Черненко, *Квант. электрон.*, 49(5), 479–487 (2019).



## ОПТИМИЗИРОВАННОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ СЛЕДОВАНИЯ СПУТНИКОВОГО КВАНТОВОГО СИГНАЛА

А. Н. Чернов<sup>1,2,3,4</sup>, А. В. Хмелев<sup>1,2,3</sup>, В. Л. Курочкин<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Россия, г. Долгопрудный, [chernov.an@phystech.edu](mailto:chernov.an@phystech.edu)

<sup>2</sup>ООО «Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий» (Российский квантовый центр), Россия, г. Москва

<sup>3</sup>ООО «КьюСпейс Технологии», Россия, г. Москва

<sup>4</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Россия, г. Москва

Квантовые коммуникации – это совокупность методов и инструментов передачи зашифрованной информации, надежность шифрования которой гарантируется законами квантовой физики. Одним из таких инструментов является квантовое распределение ключей (КРК) со спутника, на данный момент только спутниковое КРК позволяет проводить квантово-защищённые сеансы связи на масштабах планеты.

Важный аспект КРК со спутника – временная синхронизация отправленного и принятого сигналов [1]. Известно два основных способа временной синхронизации квантового сигнала: первый с использованием вспомогательного оптического канала связи [1] и второй при помощи обработки и анализа времен регистрации квантовых отсчетов [2]. Начальным этапом временной синхронизации служит процедура восстановления частоты следования зарегистрированных квантовых импульсов.

В данной работе кратко изложены результаты моделирования принятого квантового сигнала и дальнейшего восстановления его начальной частоты следования, с точностью 1,21 нс. Симуляция сигнала была получена на экспериментальном стенде, моделирующем сигнал однофотонных импульсов с модуляцией частоты следования, задаваемой эффектом Доплера.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (Стратегический проект «Квантовый Интернет»).*

### Литература

1. S.K. Liao, W.Q. Cai, W.Y. Liu et al., *Nature*, 549(7670), 43–47 (2017).
2. C.Z. Wang, Y. Li, W.Q. Cai, W.Y. Liu, S.K. Liao, C.Z. Peng, *Opt. Express*, 29(19), 29595–29603 (2021).

## МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ FTIR-СПЕКТРОВ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

О. Г. Чечёкина<sup>1,2</sup>, К. Н. Болдырев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», Россия, г. Москва*

<sup>2</sup>*Институт спектроскопии РАН, Россия, г. Троицк, [ella.esta.olga@gmail.ru](mailto:ella.esta.olga@gmail.ru)*

Анализ биологических жидкостей играет важную роль при раннем выявлении заболеваний. Однако традиционные методы исследования времязатратны, требуют специального лабораторного оборудования и расходных материалов. Поэтому разработка недорогих неинвазивных методов обнаружения изменений в биожидкостях, позволяющих быстрее ставить диагнозы и назначать соответствующее лечение, имеет большое значение.

Излучение среднего инфракрасного (ИК) диапазона взаимодействует с молекулами, позволяя исследовать их колебания. Исследуя ИК-спектр, можно получить уникальный «отпечаток пальца» молекулярных соединений, находящихся в изучаемой пробе. ИК-спектроскопия обладает огромным потенциалом для анализа биожидкостей, так как позволяет получать исчерпывающую информацию о химическом составе образцов. По сравнению с другими методами ИК-спектроскопия имеет множество преимуществ, включая малый объем пробы, необходимый для получения спектра, минимальное время, затрачиваемое на её подготовку, а также высокую чувствительность.

Зачастую ИК-спектроскопия используется для выявления биомаркеров, ассоциированных с различными заболеваниями, такими как диабет[1], рак [2], а также сердечно-сосудистые заболевания[3]. Так, большинство предыдущих исследований посвящено классификации биологических проб. Данная работа состоит из двух частей, первая посвящена выявлению маркеров цирроза печени и построению модели классификации, в то время как вторая – разработке регрессионных моделей для предсказания биохимических параметров крови на основе ИК-Фурье-спектроскопии.

В данной работе анализ биожидкостей проводился при помощи ИК-Фурье-спектрометра Bruker IFS 125 HR с применением методики нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). В ходе исследования был разработан протокол регистрации ИК-спектров мочи и плазмы крови, выявлены биологические маркеры цирроза печени, разработана модель классификации, а также новый метод оценки биохимических параметров крови на основе полученных спектров. Всего в ходе работы было получено 140 спектров крови, а также 40 спектров мочи, область от 600 до 1800 см<sup>-1</sup> оказалась наиболее информативной и использовалась для дальнейших предсказаний. Для построения эффективной модели классификации был проведен препроцессинг данных, который включал нормирова-

ние спектров и применение алгоритма Recursive Feature Elimination (RFE) для снижения размерности данных, после чего были построены модели, осуществляющие классификацию с точностью более 90 %. При работе со спектрами крови, был проведен аналогичный препроцессинг данных, после чего было осуществлено предсказание биохимических параметров при помощи классических методов регрессии с приемлемыми средне-квадратичными ошибками. Также была разработана архитектура и подобраны гиперпараметры нейросети, не требующей препроцессинга данных и также предсказывающей значения биохимических параметров с приемлемой точностью. Результаты данного исследования важны для развития методов анализа биожидкостей и могут иметь потенциальное применение в клинической экспресс-диагностике.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 19-72-10132П.*

#### Литература

1. P. Guang, W. Huang, L. Guo, X. Yang, F. Huang, M. Yang, W. Wen, L. Li, *Medicine*, 99(15), e19657 (2020).
2. V.E. Sitnikova, M.A. Kotkova, T.N. Nosenko, T.N. Kotkova, D.M. Martynova, M.V. Uspenskaya, *Talanta*, 214, 120857 (2020).
3. S.L. Haas, R. Müller, A. Fernandes, K. Dzyek-Boycheva, S. Würfl, J. Hohmann, S. Hemberger, E. Elmas, M. Bruckmann, P. Bugert, J. Backhaus, *Appl. Spectrosc.*, 64(3), 262–267 (2010).

## УПРАВЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫМИ СВОЙСТВАМИ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК Ag<sub>2</sub>S И PbS ПРИ ИХ БИНАРНОЙ АССОЦИИИ

О. В. Овчинников, М. С. Смирнов, И. Г. Гревцева,  
Е. А. Возгорькова, К. С. Чирков

*Воронежский государственный университет,  
Россия, г. Воронеж, [kirill200598@mail.ru](mailto:kirill200598@mail.ru)*

Конструкции из нескольких полупроводниковых коллоидных КТ с переносом заряда интересны для создания новых фотодетекторов, систем фотовольтаики, фотокатализаторов, а конструкции с переносом энергии – для разработки оптических компьютеров, систем кодирования и защиты информации [1; 2]. Таким образом, разработка приемов создания бинарных ассоциатов полупроводниковых коллоидных КТ со специально подобранными размерно-зависимыми энергетическими и оптическими свойствами представляет фундаментальный и практический интерес. Важнейшее значение для понимания фотоники таких конструкций имеют люминесцентные свойства и механизмы их трансформации по сравнению с исходными, характерными для отдельных коллоидных КТ определенного состава.

В данном сообщении выполнен анализ люминесцентных свойств бинарных ассоциатов КТ  $\text{Ag}_2\text{S}$  размером 2,6 нм и КТ  $\text{PbS}$  размером 3,0 нм, пассивированных, соответственно, тиогликолевой (ТГА) и 2-меркаптопропионовой кислотой (2МРА). Бинарные ассоциаты получали путем смешивания коллоидных растворов исходных компонентов в соотношении 10:1. По ИК спектрам поглощения и ПЭМ изображениям получены доказательства формирования бинарных ассоциатов за счет межмолекулярных взаимодействий пассиваторов в условиях взаимодействия с поверхностью соответствующих нанокристаллов

Установлено, что при образовании бинарных ассоциатов КТ  $\text{Ag}_2\text{S}_{\text{TGA}}/\text{PbS}_{\text{2MRA}}$  наблюдается кардинальная перестройка спектров фотолюминесценции. Наблюдали сильное тушение люминесценции для полос, относимых КТ  $\text{Ag}_2\text{S}_{\text{TGA}}$  и  $\text{PbS}_{\text{2MRA}}$  – с максимумами при 950 нм и при 1100 нм соответственно, и появление новой, не характерной исходным компонентам, полосы люминесценции с максимумом при 1250 нм. Найденные закономерности свидетельствуют о взаимодействии КТ, входящих в ассоциат. Механизм данного взаимодействия требует более подробного изучения.

*Работа выполнена за счет средств гранта РФФ № 22-12-00232.*

#### Литература

1. M.K. Dunlap, D.P. Ryan, P.M. Goodwin, C.J. Sheehan, J.H. Werner, S. Majumder, J.A. Hollingsworth, M.P. Gelfand, A. Van Orden, *Nanotechnology*, 34, 275202 (2023).
2. C.R. McGranahan, G.E. Wolfe, A. Falca, D.F. Watson, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 13(26), 30980–30991 (2021).

### ФОТОИОНИЗАЦИЯ ИОНОВ $\text{Yb}^{3+}$ В КРИСТАЛЛАХ $\text{LiCaAlF}_6:\text{Ce}^{3+}\text{Yb}^{3+}$

А. А. Шакиров, А. С. Низамутдинов, Е. А. Горшкова,  
А. А. Шавельев, В. В. Семашко

*Казанский (Приволжский) федеральный университет,  
Россия, г. Казань, shakirov\_1995@mail.ru*

Твердотельные лазерные системы на основе фторидных кристаллов  $\text{LiCaAlF}_6:\text{Ce}$  начали привлекать внимание с исследования данного твердого раствора Дубинским [1]. Данные соединения являются основой стабильного лазерного источника в УФ области. Такие лазеры применяются в экологии и в медицине. Также данное соединение является перспективным высокотемпературным сцинтиллятором [2]. Проблемой кристаллов  $\text{LiCaAlF}_6:\text{Ce}$  являются фотодинамические процессы и центры окраски F-типа, которые сильно влияют на выходные характеристики. На основе предыдущих исследований [3], мы предложили кристалл с двойной активацией, чтобы вторая примесь, а именно ионы  $\text{Yb}^{3+}$ , работали как ловушки фотоиндуцированных электронов в структуре  $\text{LiCaAlF}_6$ .

Исследуемые образцы  $\text{LiCaAlF}_6:\text{Ce}+\text{Yb}$  были выращены в лаборатории Казанского федерального университета методом Бриджмена [4]. В работе представлены результаты спектроскопического исследования образцов  $\text{LiCaAlF}_6$  активированных ионами  $\text{Ce}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$ . При ультрафиолетовом возбуждении в полосе поглощения ионов  $\text{Ce}^{3+}$  наблюдалась люминесценция ионов  $\text{Ce}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{2+}$  на длинах волн 280–320 нм и на 380 нм соответственно. Появление двухвалентного иттербия, по-видимому, за счет изменения валентности ионов  $\text{Yb}^{3+}$  на  $\text{Yb}^{2+}$ , мы связываем с фотоионизацией ионов  $\text{Ce}^{3+}$  и последующим захватом свободного носителя заряда ионами  $\text{Yb}^{3+}$ . Была зарегистрирована температурная зависимость медленной компоненты времени жизни иона  $\text{Yb}^{2+}$  в образце, обусловленная наличием двух разрешенных переходов с отличающейся вероятностью из близко расположенных уровней в основное состояние.

Нами была получена лазерная генерация на кристалле  $\text{LiCaAlF}_6:\text{Ce}^{3+}+\text{Yb}^{3+}$  на длине волны 290 нм, что подтверждает, что данное соединение является перспективной активной средой УФ диапазона.

#### Литература

1. M.A. Dubinskii, V.V. Semashko, A.K. Naumov, R.Yu. Abdulsabirov, S.L. Korableva, *J. Mod. Opt.*, 40(1), 1–5 (1993).
2. A. Gektin, N. Shiran, S. Neicheva, V. Gavriilyuk, A. Bensalah, T. Fukuda, K. Shimamura, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 486(1-2), 274–277 (2002).
3. A.S. Nizamutdinov, V.V. Semashko, A.K. Naumov, R.Yu. Abdulsabirov, S.L. Korableva, M.A. Marisov, *Phys. Solid State*, 47(8), 1457–1459 (2005).
4. A.A. Shavelev, A.S. Nizamutdinov, M.A. Marisov, I.I. Farukhshin, O.A. Morozov, N.F. Rakhimov, E.V. Lukinova, S.L. Korableva, V.V. Semashko, *J. Cryst. Growth*, 485, 73–77 (2018).

## ОПТИЧЕСКАЯ ОРИЕНТАЦИЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ СПИНОВАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В НЕПРЯМОЗОННЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ

Т. С. Шамирзаев

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,  
Россия, г. Новосибирск, [sha\\_tim@mail.ru](mailto:sha_tim@mail.ru)*

Развитие эпитаксиальных технологий роста привело к созданию низкоразмерных полупроводниковых гетероструктур: квантовых ям (КЯ), сверхрешеток (СР), квантовых точек (КТ) – объектов с новыми, не существующими в природе, электронными и оптическими свойствами, использование которых не только открыло широкие возможности для создания многочисленных полупроводниковых приборов, но и позволило проводить исследования физических явлений фундаментального характера.

В лекции будет представлен обзор современного состояния дел в области изучения спиновой поляризации электронной подсистемы в низкоразмерных структурах. Особое внимание уделено обсуждению взаимо-

действия спина электрона с флуктуациями ядерных спинов в КТ. Будут продемонстрированы: (1) эффект спиновой блокады при квазирезонансном возбуждении, препятствующий поглощению циркулярно-поляризованного фотона в непрямозонной квантовой точке, уже занятой оптически неактивным спин-поляризованным экситоном [1]; (2) Динамическая спиновая поляризация электронов в КТ через сверхтонкое взаимодействие в слабом магнитное поле при не резонансом, не поляризованном оптическом возбуждении, которое напрямую не поляризует ни ядра, ни электроны [2].

*Работа поддержана РФФ (проект №22-12-00022).*

#### **Литература**

1. T.S. Shamirzaev, A.V. Shumilin, D.S. Smirnov, D. Kudlacik, S.V. Nekrasov, Yu.G. Kusrayev, D.R. Yakovlev, M. Bayer, *Nanomaterials*, 13, 729 (2023).
2. D.S. Smirnov, T.S. Shamirzaev, D.R. Yakovlev, M. Bayer, *Phys. Rev. Lett.*, 125, 156801 (2020).

## **О ВОЗМОЖНОСТИ УСИЛЕНИЯ СВЕТА СЕЛЕКТИВНО ПО СОСТОЯНИЯМ ОРИЕНТИРОВАННЫМИ ИМПУЛЬСНЫМ ПОЛЕМ МОЛЕКУЛАМИ**

А. В. Шамшуриц, В. В. Слабко, И. А. Кузватов

*Сибирский федеральный университет,  
Россия, г. Красноярск, [shamshurin.alex@mail.ru](mailto:shamshurin.alex@mail.ru)*

Для усиления излучения обычно предполагается необходимость создания инверсии заселенностей уровней резонансного перехода. Инверсия заселенности, вообще говоря, является лишь частным случаем, в котором мощность испускания преобладает над поглощением и, следовательно, происходит усиление света. Возможны различные ситуации, связанные с различием вероятностей поглощения и излучения фотонов, когда для усиления не требуется инверсии заселенностей [1].

В работе [2] была рассмотрена возможность безинверсного усиления света в системе селективно по состояниям дихроичных молекул, ориентированных во внешнем постоянном поле. При этом предполагалось, что время жизни возбужденного состояния много больше времени установления ориентационного равновесия. Это условие, как и ограничение величины ориентирующего поля напряжением пробоя, сильно сужает выбор конкретных молекул для экспериментального исследования.

Однако использование в качестве ориентирующего поля импульсов длительностью порядка наносекунд позволяет увеличить на порядок напряжение порога пробоя и наблюдение безинверсного усиления становится возможным в целом ряде молекул. Кроме того, ориентация недипольных молекул возможна в поле импульсного лазерного излучения [3].

В данной работе на основе связанной системы уравнений Больцмана численно анализируется влияние импульсного характера ориентирующего поля как для случая дипольных, так и недипольных молекул. Показано, что условие безынверсного усиления в этом случае возможно для ряда реальных молекул. При ориентации в поле лазерного излучения с интенсивностями меньшими, чем пробойные проанализированы условия реализации безынверсного усиления. Выполнены численный анализ на примере легких двухатомные молекулы ( $I_2$ ).

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ Сибирскому федеральному университету (No FSRZ-2020-0012).*

### Литература

1. J. Mompert, R.J. Corbalan, *J. Opt. B*, 2(3), R7–R24 (2000).
2. A.K. Popov, V.V. Slabko, *Opt. Lett.*, 30(13), 1719–1721 (2005).
3. А.В. Шамшурин, И.А. Кузоватов, А.С. Ципотан, В.В. Слабко, *Квант. электрон.*, 48(11), 1076–1082 (2018).

## ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ВНЕКАРКАСНЫХ КОМПОНЕНТОВ В МИКРОПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ СО СТРУКТУРОЙ СОДАЛИТА И КАНКРИНИТА

Р. Ю. Шендрик<sup>1</sup>, Н. В. Чуканов<sup>2,3</sup>, М. Ф. Вигасина<sup>3</sup>, А. Н. Сапожников<sup>1</sup>,  
Е. В. Канева<sup>1</sup>, Т. А. Радомская<sup>1</sup>, И. В. Пеков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, Россия, г. Иркутск,  
roshen@yandex.ru*

<sup>2</sup>*Федеральный исследовательский центр проблем химической физики  
и медицинской химии РАН, Россия, Московская обл., г. Черноголовка*

<sup>3</sup>*Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова, Россия, г. Москва*

В работе получены новые данные по спектроскопии фельдшпатоидов групп содалита, канкринита и скаполита из лазуритсодержащих метасоматитов, щелочных интрузивных и эффузивных пород. Данные минералы являются природными аналогами новых перспективных микропористых функциональных материалов, которые используются в качестве эффективных люминофоров и рентгеновских фосфоров, компонентов водородных ячеек, мембран для разделения газов и контейнеров для радиоактивных материалов.

Комплексное исследование минералов групп канкринита и содалита методами электронной и колебательной спектроскопии привело к установлению основных типов внекаркасных компонентов и их влияние на окраску и люминесценцию исследуемых минералов. Выделено три типа анион-радикалов, приводящие к синей окраске:  $(CO_3)^{\bullet-}$  [1],  $S_3^{\bullet-}$  [2],  $S_4$  [3]. Изучены их термические и фотопревращения.

Также в работе исследуется собственная люминесценция в микропористых материалах со структурой канкринита и содалита и механизмы образования радиационных дефектов в них.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 22-17-00006).*

#### Литература

1. E. Kaneva, R. Shendrik, *J. Lumin.*, 243, 118628 (2022).
2. N.V. Chukanov, M.F. Vigasina, R.Yu. Shendrik, D.A. Varlamov, I.V. Pekov, N.V. Zubkova, *Minerals*, 12(6), 729 (2022).
3. N.V. Chukanov, R.Yu. Shendrik, M.F. Vigasina, I.V. Pekov, A.N. Sapozhnikov, V.D. Shcherbakov, D.A. Varlamov, *Minerals*, 12(7), 887 (2022).

### ОСОБЕННОСТИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ОТКЛИКА НАНОСТРУКТУР АНОДНОГО ДИОКСИДА ГАФНИЯ

А. О. Шилов<sup>1</sup>, Р. В. Камалов<sup>1</sup>, А. С. Вохминцев<sup>1</sup>, И. А. Вайнштейн<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>НОЦ «Наноматериалы и нанотехнологии», Уральский федеральный  
университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
Россия, г. Екатеринбург, [ao.shilov@urfu.ru](mailto:ao.shilov@urfu.ru)

<sup>2</sup>Институт металлургии УрО РАН, Россия, г. Екатеринбург

Большой интерес к диоксиду гафния с различной морфологией обусловлен перспективами создания светоизлучающих матриц как в условиях формирования примесных оптически активных центров, так и без специального легирования редкоземельными ионами. В обоих случаях возникающий атомный дефицит в анионной подрешетке обеспечивает наличие излучательных переходов в синей области спектра и может быть использован для варьирования спектральных характеристик люминофора. Известно, что выращивание нестехиометрического номинально-чистого  $\text{HfO}_2$  методом электрохимического окисления металлического гафния позволяет получать люминесцирующие наноструктуры с большой удельной поверхностью и высокой концентрацией кислород-дефицитных центров. В данной работе изучено влияние электрохимических параметров синтеза на люминесцентный отклик структур анодного  $\text{HfO}_2$ .

Исследовано влияние условий анодирования на морфологические особенности диоксида гафния. Установлены оптимальные параметры, при которых формируются нанопористые и нанотубулярные структуры. Показано, что исходные выращенные нанотрубки являются аморфными, а после отжига при 700 °С наблюдается переход в кристаллическое состояние с моноклинной симметрией. Оптические свойства синтезированных нанотрубок в области края собственного поглощения изучены методом диффузного отражения. В предположении не прямых межзонных переходов проведена оценка ширины запрещенной зоны 5,20 и 5,32 эВ для исходных структур и после отжига, соответственно.



Показано, что свечение исследуемых нанотрубок при возбуждении фотонами  $h\nu > 4,3$  эВ обусловлено кислородными вакансиями и характеризуется полосой гауссовой формы с максимумом 2,36 эВ. После отжига наблюдается небольшое смещение ФЛ в синюю область. Термолюминесцентный отклик в диапазоне 77–623 К имеет близкий спектральный состав и регистрируется после облучения фотонами с энергией 4,5 эВ. С учетом известных литературных данных обсуждается природа активных центров и механизмы процессов захвата и рекомбинации.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-22-00310.*

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ДЕТЕКТОРОВ ДТГ-4 ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ДОЗЫ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

Е. В. Шиндякин, А. С. Уваров, А. И. Непомнящих,  
Н. С. Бобина, В. К. Платонов

*Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН,  
Россия, г. Иркутск, [eshindyakin@mail.ru](mailto:eshindyakin@mail.ru)  
Областной онкологический диспансер, Россия, г. Иркутск*

Актуальной задачей в современной лучевой терапии является контроль подведения дозы к объему облучения. Одним из способов контроля является *in-vivo* дозиметрия с использованием термолюминесцентных (ТЛД) детекторов [1].

В рамках данной работы для измерений использовались ТЛД детекторы ДТГ-4. Индивидуальная калибровка детекторов приводилась в терапевтическом пучке фотонного излучения линейного ускорителя Varian TrueBeam. Считывание показаний детекторов производилось на установке «Доза-ТЛД». Также нами был разработан и изготовлен [2] антропоморфный фантом молочной железы. В фантоме предусмотрены посадочные места для установки ТЛД детекторов ДТГ-4. Детектор располагается в фантоме таким образом, что передняя поверхность детектора совпадает с поверхностью фантома.

Облучение фантома с установленными в нем детекторами производилось на линейных ускорителях Varian Halcyon и Varian TrueBeam в соответствии с подготовленными планами облучения.

Полученные данные позволили оценить поверхностные дозы при облучении фантома молочной железы различными методиками облучения.

### Литература

1. Development of Procedures for In Vivo Dosimetry in Radiotherapy. IAEA Human Health Reports No. 8. Vienna: IAEA, 2013. 179 p.
2. Y. Zhao, K. Moran, M. Yewondwossen, J. Allan, S. Clarke, M. Rajaraman, D. Wilke, P. Joseph, J.L. Robar, *Med. Dosim.*, 42(2), 150–155 (2017).
3. S.N. Chen, P. Ramachandran, P. Deb, *Radiat. Oncol. J.*, 38(4) 270–281 (2020).

## ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ С КВАЗИБЕЛЫМ СПЕКТРОМ В КРИСТАЛЛАХ LiF-UO<sub>2</sub> С ЦЕНТРАМИ ОКРАСКИ

Л. И. Щепина<sup>1</sup>, Н. А. Иванов<sup>2</sup>, В. А. Ерофеева<sup>1</sup>, Л. И. Ружников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет,  
Россия, г. Иркутск, [schepina@api.isu.ru](mailto:schepina@api.isu.ru)

<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Россия, г. Иркутск, [ivnik@istu.edu](mailto:ivnik@istu.edu)

Излучатели с белым светом обычно получают путем сопряжения синего или УФ светодиода с люминофором. В настоящее время используют материалы, активированные редкоземельными элементами, например, переходы в  $\text{Eu}^{2+}$  (Sr,Ca)AlSiN<sub>3</sub> для оранжевой и красной области, либо в  $\text{Mn}^{4+}$  (K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>) [1,2]. Белые люминофоры разрабатываются также на основе полимерных люминесцентных композиций, активированных хелатами бора [3]. Авторам удалось расширить спектр эмиссии в красную область до 700–750 нм. Однако в области спектра на длине волны  $\approx 580$  нм наблюдается минимум выхода люминесценции. В предыдущих работах нами рассмотрены центры свечения в зеленой ( $\lambda_m = 523$  нм) и желтой областях спектра ( $\lambda_m = 563$  нм) кристаллов LiF-UO<sub>2</sub>. С целью расширения спектра излучения в красную область проведены исследования этих кристаллов с радиационными центрами окраски (ЦО). В спектре свечения облученного рентгеновским излучением кристалла LiF-UO<sub>2</sub> наблюдается провал в области 600 нм, который удается устранить вариацией концентрациями F<sub>2</sub> и F<sub>3</sub><sup>+</sup>-ЦО. Эксперименты были выполнены на монокристаллах LiF, активированных UO<sub>2</sub>. Коэффициент поглощения в максимуме активаторной полосы (312,5 нм) изменялся от 14 до 37 см<sup>-1</sup>. Для повышения устойчивости центров окраски под действием синих и УФ светодиодов радиационное облучение проводилось по специальной методике, ранее разработанной [4] для увеличения ресурса работы активных элементов лазеров на основе LiF(F<sub>2</sub>). Методика основана на устранении парного распределения комплементарных дефектов – электронных ЦО и ловушек электронов (дырочных центров и примесных ионов), что позволяет существенно повысить оптическую стабильность F<sub>2</sub>-центров. Изучена устойчивость рабочих центров окраски к излучению светодиода с длиной волны 399 нм и мощностью 1,2 мВт.

### Литература

1. F. Baur, T. Jansen, T. Jüstel, *J. Lumin.*, 237, 118085 (2021).
2. Д.А. Курдюков, Д.А. Еуров, М.К. Рабчинский, Д.А. Кириленко, М.М. Бржезинская, С.Д. Савельев, А.Н. Смирнов, В.Г. Голубев, *Письма в ЖТФ*, 48(7), 28–32 (2022).
3. Е.Ю. Иштокина, А.А. Хребтов, Е.В. Федоренко, З.Н. Пузырьков, Л.А. Лим, А.Г. Мирочник, *Опт. и спектр.*, 130(8), 1288–1292 (2022).
4. Л.И. Щепина, Б.Д. Лобанов, Н.Т. Максимова, В.М. Костюков, *Опт. и спектр.*, 57(2), 368–370 (1984).

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДВОЙНОГО РАДИООПТИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА В КОНФИГУРАЦИИ ХАНЛЕ В ЯЧЕЙКЕ С РУБИДИЕМ И БУФЕРНЫМ ГАЗОМ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СЛАБЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ

В. М. Энтин<sup>1</sup>, Д. В. Бражников<sup>2,3</sup>, И. И. Рябцев<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,  
Россия, г. Новосибирск, [ventin@isp.nsc.ru](mailto:ventin@isp.nsc.ru)*

<sup>2</sup>*Институт лазерной физики СО РАН, Россия, г. Новосибирск*

<sup>3</sup>*Новосибирский национальный исследовательский  
государственный университет, Россия, г. Новосибирск*

В настоящей работе приведены результаты экспериментального и теоретического исследования поглощения световой волны, взаимодействия с оптическими переходами в D<sub>1</sub> линии атомов <sup>87</sup>Rb ( $\lambda \approx 795$  нм) в присутствии микроволнового излучения ( $f_{MW} \approx 6,834$  ГГц), резонансного магнито-дипольным переходам между сверхтонкими компонентами основного состояния. Эксперимент выполнен в миниатюрной ячейке ( $V \sim 0,1$  см<sup>3</sup>), экранированной от лабораторных магнитных полей в условиях наблюдения магнитооптических резонансов поглощения при сканировании магнитного поля в окрестности нуля в схеме наблюдения Ханле-резонансов.

Отличительной особенностью условий эксперимента является наличие буферного газа аргона при давлении 95 торр. При этом отдельные сверхтонкие подуровни возбужденного состояния спектрально не разрешаются из-за столкновительного уширения. Эти условия приводят к практически полному подавлению резонансов пересечения уровней (эффекта Ханле в основном состоянии). Однако включение резонансного микроволнового излучения позволяет более чем на порядок увеличить амплитуду магнитооптического резонанса. При этом также наблюдается смена знака резонанса: электромагнитно-индуцированная прозрачность (ЭИП) переходит в электромагнитно-индуцированную абсорбцию (ЭИА).

Теоретический анализ продемонстрировал, что значительное увеличение амплитуды магнитооптического резонанса происходит благодаря эффекту двойного радиооптического резонанса (ДРОР). Также из проведенного анализа следует, что в ячейках с меньшим давлением буферного газа эффекты ДРОР и Ханле могли бы конкурировать между собой деструктивным образом, т. е. подавлять действие друг друга. В условиях же нашего эксперимента эффект Ханле существенно подавлен, поэтому эффект ДРОР проявляется в полной мере, приводя к наблюдению магнитооптического резонанса с большой амплитудой.

Полученные результаты могут быть использованы в области квантовой магнитометрии для измерения сверхслабых постоянных магнитных полей, а также для измерения неоднородности резонансного микроволнового излучения в ячейке с парами атомов щелочного металла (см., например, [2]).

*Экспериментальные работы выполнены при поддержке РФФИ (грант № 20-52-18004). Теоретический анализ наблюдаемых эффектов был выполнен при поддержке РФФИ (грант № 23-12-00195).*

#### **Литература**

1. Д.В. Бражников, В.М. Энтин, И.И. Рябцев, «Двойной радиооптический резонанс в конфигурации Ханле при возбуждении D1-линии поглощения атомов щелочных металлов», *ЖЭТФ* (принято к публикации).
2. C. Affolderbach, G.X. Du, T. Bandi, A. Horsley, P. Treutlein, G. Miletì, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 64(12), 3629–3637 (2015).

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Farouk A. M., Beterov I. I., Xu P., Ryabtsev I. I.</b> Scalable heteronuclear architecture of neutral atoms based on EIT .....	3
<b>Martynovich E. F., Frolova A. S., Unurbileg D., Ulziybayar E., Bukhtsoozh O., Davaasambuu J.</b> Linear and nonlinear excitation of color centers in a LiF crystal by femtosecond laser emission .....	4
<b>Sang X., Song F., Xu R., Yang J., Zhao Z., Feng M., Huang W.</b> Color regulation for rare-earth/liquid-crystals composites .....	6
<b>Severin A. S., Plyushin B. B., Pervunin K. S.</b> PIV measurements in a bubbly free jet to study its turbulence structure .....	6
<b>Xu R., Feng M., Yang J., Sang X., Zhao Z., Song F.</b> Optical field transmission in complex medium and its encryption applications .....	7
<b>Song F., Yang J.</b> Additive manufacturing and luminescent properties of rare earth/phosphor doped glasses .....	8
<b>Song F., Zhao Z.</b> Mechanism analysis and experiment study on laser cleaning .....	9
<b>Zuhayri H., A. Samarina A., Lopez Guardado D. A., Zakharova O. A., Baalbaki H., Borisov A. V., Krivova N. A., Kistenev Yu. V.</b> Quantitative comparison of topical low-dose photodynamic therapy using 5-aminolevulinic acid and methylene blue in diabetic wound healing in-vivo using raman spectroscopy .....	10
<b>Абрамкин Д. С., Петрушков М. О., Богомолов Д. Б., Емельянов Е. А., Есин М. Ю., Васев А. В., Bloшкин А. А., Коптев Е. С., Путьято М. А., Атучин В. В., Преображенский В. В.</b> Новые квантовые точки GaSb/ALP: формирование, структурные свойства и энергетический спектр .....	12
<b>Абрамкин Д. С., Александров И. А.</b> Перспективы применения $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ квантовых точек для создания универсальной памяти.....	13
<b>Авдеев И. Д., Нестоклон М. О., Гупалов С. В.</b> Магнитооптические свойства и долинная структура экситона в квантовых точках из халькогенидов свинца .....	14
<b>Аграфонов Ю. В., Петрушин И. С., Халаимов Д. В., Безлер И. В.</b> Структура тонких граничных слоев жидкости вблизи твердой поверхности.....	16
<b>Алексеев С. В., Лосев В. Ф., Трунов В. И., Фролов С. А.</b> Исследование особенностей формирования спектра второй гармоники chirpированного фемтосекундного импульса излучения.....	17
<b>Адуев Б. П., Алукер Н. Л., Артамонов А. С., Нурмухамедов Д. С.</b> Диагностика импульсного лазерного воздействия на широкозонные материалы при помощи термолюминесцентной дозиметрии.....	18

<b>Амбарникова Н. В., Полисадова Е. Ф., Лисицын В. М., Домаров Е. В.</b> Рентгенофазовый анализ люминесцентной керамики YAG:Ce, синтезированной радиационным методом .....	19
<b>Аникеева В. Е., Болдырев К. Н., Семенова О. И.</b> Рентгенолюминесценция кристаллов гибридного перовскита MAPbBr <sub>3</sub> .....	21
<b>Архипкин В. Г., Мысливец С. А.</b> Эффект тальбота при селективном отражении от индуцированной рамановской решетки .....	23
<b>Астраханцева А. В., Шавельев А. А., Кузнецов С. В., Николаев А. Г., Болдырев К. Н., Низамутдинов А. С.</b> Оценка возможности снятия самоограниченности для лазерного перехода <sup>4</sup> I <sub>11/2</sub> → <sup>4</sup> I <sub>13/2</sub> В ионе Er <sup>3+</sup> для кристаллов BaY <sub>1.8</sub> Lu <sub>0.2</sub> F <sub>8</sub> .....	24
<b>Ашмарина М. В., Аксенова Ю. В.</b> Спектрально-люминесцентные свойства комплексов дипиррометенов с d-металлами .....	25
<b>Бабкина А. Н., Зырянова К. С., Шеремет В. Г., Кульпина Е. В., Кузьменко Н. К.</b> Кинетика кристаллизации и спектральные свойства Li <sub>2</sub> O-K <sub>2</sub> O-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> стеклокерамики с хромом .....	26
<b>Барбышев К. А., Дуплинский А. В., Хмелев А. В., Курочкин В. Л.</b> Эффективность наземного приемного терминала для квантовой связи .....	27
<b>Барышников В. И.</b> Малоинерционные механизмы преобразования энергии в кристаллах возбуждаемых плотными фемтосекундными лазерными импульсами и электронными пучками .....	28
<b>Барышников В. И., Мурзина Ю. А.</b> Особенности лазерного и радиационного возбуждения люминесценции в кристаллах Ce:Y <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> .....	29
<b>Барышников В. И., Паперный В. Л.</b> Исследования сильноточных объемных пикосекундных газовых разрядов в поле фемтосекундных лазерных импульсов .....	30
<b>Батгалова Э. И., Харинцев С. С.</b> Полупроводники со структурным фазовым градиентом .....	31
<b>Безлепкина Н. П., Чайковская О. Н.</b> Люминесцентное исследование фототрансформации антибиотика в воде .....	32
<b>Безверхняя Д. М., Саакян А. Т., Пузырёв В. Н.</b> Временные характеристики рентгеновского излучения лазерной плазмы мишени из меди .....	33
<b>Бердников В. С., Винокуров В. А., Винокуров В. В., Гришков В. А., Кислицын С. А., Митин К. А., Михайлов А. В.</b> Закономерности сложного сопряженного теплообмена в методах направленной кристаллизации и их влияние на формы фронтов кристаллизации и тепловую историю кристаллов .....	34
<b>Кислицын С. А., Михайлов А. В., Митин К. А., Бердников В. С.</b> Экспериментальные и численные исследования кристаллизации воды на вертикальной стенке .....	35

<b>Митин К. А., Бердников В. С., Митина А. В.</b> Теплоотдача от кремниевых стержней, разогреваемых электрическим током, при получении поликристаллического кремния методом Сименса в режимах свободной конвекции .....	36
<b>Бойченко С. В.</b> Обобщённый алгоритм расчёта острой фокусировки произвольных коллимированных лазерных лучей.....	37
<b>Болдырев К. Н., Болдырев Н. Ю., Попова М. Н.</b> Люминесцентная спектроскопия высокого разрешения функциональных материалов .....	38
<b>Болдырев К. Н., Сектаров Э. С.</b> Исследование спектров рентгенолюминесценции монокристаллов карбида кремния политипных модификаций 4Н и 6Н.....	39
<b>Бородулин З. И., Васильева Л. А., Шулепов М. А.</b> Электролюминесценция никелевых центров в алмазных образцах .....	41
<b>Чайковская О. Н., Бочарникова Е. Н., Чайдонова В. С.</b> Изучение люминесцентных свойств тиазиновых красителей.....	42
<b>Брюквина Л. И., Липко С. В., Иванов Н. А.</b> Формирование наночастиц натрия в радиационно-обработанных кристаллах NaF после термического отжига и облучения светом .....	43
<b>Брюквина Л. И.</b> ИК колебания примесных комплексов в кристаллах фторида кальция, легированных ионами $\text{OH}^-$ , $\text{Ce}^{3+}$ , $\text{Eu}^{3+}$ .....	44
<b>Будкин Г. В., Дурнев М. В., Тарасенко С. А.</b> Микроскопическая теория тонкой структуры дираковских состояний в квантовых ямах $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ .....	45
<b>Бузин Д. С., Панкин П. С., Максимов Д. Н., Романенко Г. А., Сутормин В. С., Наболь С. В., Зеленев Ф. В., Масюгин А. Н., Волочаев М. Н., Ветров С. Я., Тимофеев И. В.</b> Гибридные оптические тамбовские-микрорезонаторные моды с управляемой добротностью .....	46
<b>Бураченко А. Г., Рипенко В. С., Крылов А. А., Артемов К. П., Вуколов А. В., Липатов Е. И.</b> Катоодолюминесценция и излучение Вавилова-Черенкова в алмазе в широком диапазоне температур.....	47
<b>Бутенков Д. А., Бакаева А. В., Рунина К. И., Попов А. В., Петрова О. Б.</b> Влияние концентрации хлорида свинца на спектрально-люминесцентные свойства оксохлоридных свинцово-боратных стёкол, активированных неодимом .....	48
<b>Куртина Д. А., Графова В. П., Лебедев А. И., Васильев Р. Б.</b> Атомарно-тонкие наноструктуры АПВVI с энантиомерными лигандами как платформа для хиральной фотоники.....	49
<b>Васильева Л. А., Бородулин З. И., Липатов Е. И., Гермогенов В. П.</b> Светоизлучающие P-i-N структуры на основе алмаза.....	50
<b>Витухновский А. Г., Колымагин Д. А., Грициенко А. В., Писаренко А. В., Проходцов А. И., Данилкин М. И., Прутсков Г. В.</b> Фемтосекундная двухфотонная фотополимеризация – создание 3D микроструктур для оптических приложений .....	52

<b>Войтенко Д. С., Липатов Е. И.</b> Температурные зависимости фотолюминесценции фоновых компонент излучательной рекомбинации электронных возбуждений в беспримесном алмазе .....	53
<b>Волокитина А. В., Гончарова Д. А., Светличный В. А.</b> Фотокалитические свойства металл-оксидных наноконпозитов ZnO-Ag, полученных методом импульсной лазерной абляции .....	54
<b>Волошин Г. В., Хуэй Мэн, Соколов И. М., Курапцев А. С.</b> Влияние столкновений на характер эффекта электромагнитно-индуцированной прозрачности в ячейках конечных продольных размеров с антирелаксационными покрытиями стенок.....	55
<b>Вострикова Л. И., Карташов И. А.</b> Сравнение генерации второй гармоники в алюминий и германий содержащих стеклянных материалах .....	56
<b>Вяткин Е. С., Пошакинский А. В., Тарасенко С. А.</b> Оптическая активность скрученных метаповерхностей, обусловленная ближнепольным взаимодействием.....	57
<b>Гармышева Т. Ю., Непомнящих А. И., Шендрик Р. Ю., Паклин А. С., Шалаев А. А.</b> Люминесценция кварцевых стекол, полученных из природных кварцитов.....	58
<b>Генин Д. Е., Липатов Е. И., Измайлов И. В., Винс В. Г., Елисеев А. П., Саввин А. Д.</b> Лазеры на NV-центрах в алмазе: современное состояние и перспективы .....	59
<b>Самолов А. В., Генин Д. Е., Липатов Е. И.</b> Температурная динамика спектра излучения лазера на NV-центрах в алмазе.....	60
<b>Герасимова М. А.</b> Влияние галогенид-ионов на эффективность люминесценции органических красителей .....	61
<b>Голубовская А. Г., Светличный В. А.</b> Синтез и фотокаталитические свойства наноконпозитов $\beta$ -Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Bi <sub>12</sub> SiO <sub>20</sub> , полученных импульсной лазерной абляцией .....	62
<b>Горева О. В., Никонович О. Л., Дудаев М. А., Баданов Р. Н.</b> Моделирование оптических и нелинейно-оптических свойств органических веществ в среде FEMAP .....	63
<b>Барышников В. И., Горева О. В., Колесникова Т. А., Никонович О. Л., Мурзина Ю. А.</b> Нелинейное фемтосекундное лазерное возбуждение собственной и примесной люминесценции кристаллов.....	64
<b>Гревцева И. Г., Овчинников О. В., Смирнов М. С., Асланов С. В., Асташкина М. С.</b> Фотостабильность люминесценции коллоидных квантовых точек Ag <sub>2</sub> S в присутствии плазмонных наночастиц Au.....	65
<b>Григоров Я. И., Мартынович Е. Ф., Тютрин А. А., Ракевич А. Л., Шульгина М. Е., Прокопьев С. А., Данилов Б. С., Гладкочуб Д. П.</b> Применение лазерно-люминесцентных методов для исследования рудного концентрата бурун-нарынского месторождения.....	66



<b>Гулина Ю. С., Красин Г. К., Кузьмин Е. В., Чжу Ц., Кудряшов С. И.</b> Влияние числовой апертуры на формирование люминесцентных каналов в синтетическом алмазе под воздействием ультракоротких лазерных импульсов .....	67
<b>Давыдов Е. И., Петровский А. Ф., Дресвянский В. П., Мартынович Е. Ф.</b> Установка для получения барьерного разряда .....	68
<b>Дайбаге Д. С., Осадченко А. В., Захарчук И. А., Селюков А. С., Амбровевич С. А., Скориков М. Л., Васильев Р. Б.</b> Люминесценция ультратонких нанопластин CdSe.....	70
<b>Данилов П. А., Помазкин Д. А., Матяев И. Д., Илюшин П. Я.</b> Филаментация ультракоротких лазерных импульсов видимого-ближнего Ик-диапазона в воде.....	71
<b>Дармаев Э. Ч., Иконников Д. А., Мысливец С. А., Архипкин В. Г., Вьюньшев А. М.</b> Применение эффекта Тальбота для формирования суперпозиционных оптических решёток .....	72
<b>Дерепко В. Н., Овчинников О. В., Смирнов М. С., Асланов С. В.</b> ИК люминесценция коллоидных квантовых точек селенида серебра .....	73
<b>Диденко Я. С., Субботин К. А., Титов А. И., Лис Д. А., Павлов С. К., Волков П. А., Зыкова М. П.</b> Выращивание и исследование перспективного лазерного кристалла Nd:MgMoO <sub>4</sub> .....	74
<b>Добрецова Е. А., Алимов О. К., Цветков В. С., Русанов С. Я., Воронов В. В., Цветков В. Б.</b> Оптически-активные центры тулия в кристалле иттриевого скандата .....	75
<b>Добрецова Е. А., Алимов О. К., Цветков В. С., Русанов С. Я., Воронов В. В., Цветков В. Б.</b> Штарковская структура электронных уровней иона неодима в иттриевом скандате .....	76
<b>Докудовская А. К., Пудовкин М. С., Олейникова Е. И., Кораблева С. Л., Морозов О. А.</b> Оптические температурные сенсоры на основе даун-конверсионных микрочастиц Nd <sup>3+</sup> , Yb <sup>3+</sup> :LiYF <sub>4</sub> .....	77
<b>Дормидонов А. Е., Залозная Е. Д., Компанец В. О., Симонова В. А., Чекалин С. В., Кандидов В. П.</b> Формирование и спектр одноцикловой световой пули среднего инфракрасного диапазона .....	78
<b>Дресвянский В. П., Мартынович Е. Ф.</b> Анизотропия лазерно-индуцированного дефектообразования в диэлектрических кристаллах.....	79
<b>Егранов А. В.</b> Перестройка ближайшего окружения около неустойчивых примесных ионов.....	81
<b>Емельянова А. С., Миронов В. П., Глазунов Д. С., Шабалин С. А., Бубырь Е. В., Казаков Л. В., Мартынович Е. Ф.</b> Межзонная рекомбинация в алмазе через локальные центры .....	82
<b>Ерушин Е. Ю., Беднякова А. Е., Мирошниченко И. Б., Костюкова Н. Ю., Бойко А. А., Редюк А. А.</b> Повышение долговременной стабильности опто-акустического газового сенсора с помощью алгоритма управления поиском экстремума .....	83

- Ерушин Е. Ю., Костюкова Н. Ю., Бойко А. А., Баранова Е. В., Вербоватый Д. М., Бадиков Д. В.** Исследование порога лучевой стойкости нового кристалла  $\text{Ba}_2\text{Ga}_8\text{GeS}_{16}$  ..... 84
- Ерушин Е. Ю., Костюкова Н. Ю., Бойко А. А., Баранова Е. В., Вербоватый Д. М., Бадиков Д. В.** Исследование лучевой стойкости серосодержащих кристаллов бариевых халькогенидов ..... 85
- Жилин М. А., Карапузиков А. И.** Численная модель каустик гауссовых пучков в резонаторе щелевого  $\text{CO}_2$ -лазера ..... 86
- Жмыхов В. Ю., Гурьев Д. А., Добрецова Е. А., Цветков В. С., Кузнецов С. В., Никова М. С., Чикулина И. С., Вакалов Д. С., Тарала В. А., Цветков В. Б.** Исследование спектральных и энергетических характеристик лазерной генерации  $\text{Yb:YSAG}$  керамики ..... 87
- Залозная Е. Д., Дормидонов А. Е., Компанец В. О., Симонова В. А., Чекалин С. В., Кандидов В. П.** Динамика взаимодействия одноклоковой световой пули с диэлектриком ..... 88
- Захарчук И. А., Дайбаге Д. С., Осадченко А. В., Селоков А. С., Амброзевич С. А., Данилкин М. И., Ивкина О. В., Мосягина И. В.** Оптическое считывание люминесцентных дозиметрических материалов на основе  $\text{MgV}_4\text{O}_7:\text{Dy,Na}$  ..... 89
- Звягин А. И., Чевычелова Т. А., Овчинников О. В.** Влияние оболочки  $\text{SiO}_2$  на нелинейно-оптические свойства квантовых точек  $\text{PbS}$  в присутствии наностержней золота ..... 90
- Звягин А. И., Чевычелова Т. А., Овчинников О. В.** Проявление плазмон-экситонного взаимодействия в нелинейно-оптическом отклике квантовых точек  $\text{Zn}_0.5\text{Cd}_{0.5}\text{S}$  в присутствии наночастиц серебра ..... 91
- Зимина Ю. И., Субботин К. А., Титов А. И., Лис Д. А., Диденко Я. С., Elabedine G. Z., Ereemeev K., Solé R. M., Aguiló M., Волков П. А., Попов П. А., Díaz F., Camy P., Mateos X., Лойко П. А.** Исследования нового лазерного кристалла  $\text{Tm}^{3+}:\text{MgMoO}_4$  ..... 92
- Зыкова С. С., Серкина К. С., Рунина К. И., Петрова О. Б.** Люминесцентные свойства свинцовых борогерманатных стекол, легированных самарием и гадолинием ..... 93
- Ивченко Е. И., Хмелев А. В., Курочкин В. Л.** Улучшение оценки длины секретного ключа в канале спутник Земля ..... 94
- Избасарова Э. А., Харинцев С. С.** Оптический нагрев кремниевых кантилеверов, используемых в атомно-силовой микроскопии ..... 95
- Генин Д. Е., Измайлов И. В., Липатов Е. И., Лячин А. В.** Опыт расчёта усиления и потерь для искусственного алмаза с NV-центрами ..... 96
- Измайлова Н. В., Самсонова Л. Г., Дегтяренко К. М.** Спектральные характеристики и мобильность зарядов в донорно-акцепторных соединениях дибензтиофенов с конформационными изменениями ..... 97

<b>Вьюнышева С. А., Мысливец С. А., Давлетшин Н. Н., Иконников Д. А., Еремеева Е. В., Высоцкий Е. С., Павлов И. Н., Вьюнышев А. М.</b> Усиление лазерно-индуцированной флуоресценции зеленого флуоресцентного белка, возбуждаемой фемтосекундными лазерными импульсами.....	98
<b>Иконников Д. А., Мысливец С. А., Архипкин В. Г., Вьюнышев А. М.</b> Дифракция Френеля оптических вихрей на вилкообразной решетке .....	99
<b>Ильенков Р. Я., Прудников О. Н., Кирпичникова А. А., Тайченачев А. В., Юдин В. И.</b> Кинетика лазерного охлаждения атомов в бихроматическом поле .....	100
<b>Дресвянский В. П., Ищенко А. С., Мартынович Е. Ф., Черных А. А., Паперный В. Л.</b> Люминесцентные свойства поверхностных слоев, содержащих наноразмерные металлические кластеры, в ЩГК .....	101
<b>Казанцева А. В., Харинцев С. С.</b> Определение стеклования олигомерных и полимерных структур методом комбинационного рассеяния света.....	102
<b>Казаринова Д. Д., Коняшкин А. В., Рябушкин О. А.</b> Измерение малых коэффициентов оптического поглощения кристаллов трибората лития на длине волны 1070 нм .....	103
<b>Каримуллин К. Р., Аржанов А. И., Магарян К. А., Савостьянов А. О., Наумов А. В.</b> Изучение люминесцентных свойств полупроводниковых квантовых точек и композитов на их основе для приложений в фотонике.....	104
<b>Ильенков Р. Я., Кирпичникова А. А., Прудников О. Н.</b> Поиск оптимальных параметров для бихроматической схемы лазерного охлаждения атомов $^6\text{Li}$ .....	105
<b>Ковалев М. С., Кудряшов С. И.</b> Нанослой кремния, сверхлегированный золотом: лазерные методы обработки и конечные свойства материала.....	106
<b>Колесников И. Е., Мамонова Д. В., Курочкин М. А.</b> Мультипараметрическая люминесцентная термометрия .....	106
<b>Красин Г. К., Кудряшов С. И.</b> Поляризационно-чувствительные фотолюминесценция и филаментация ультракоротких лазерных импульсов в алмазе.....	107
<b>Кривошеев Н. Д., Зилев С. А., Дресвянский В. П., Мартынович Е. Ф.</b> Флуктуирующая люминесценция одиночного X-центра в кристалле LiF.....	108
<b>Крутикова И. В., Нефедова К. В.</b> Сцинтилляционные керамические наночастицы, полученные методом горения в растворах.....	110
<b>Крылов А. А., Бураченко А. Г., Переседова Д. А., Рипенко В. С., Липатов Е. И.</b> Катодолюминесценция различных центров свечения в алмазных образцах при высоких температурах.....	111

<b>Кудряшов С. И.</b> Квантовые и атомистические процессы фемтосекундной лазерной записи в диэлектриках.....	112
<b>Кузнецов А. В.</b> Осцилляция поперечного размера световой пули.....	112
<b>Кузнецов А. В., Шалин А. С.</b> Диэлектрические метаповерхности в гибридном анапольном режиме с квази-ССК.....	113
<b>Кузнецова Д. О., Слюсарева Е. А., Слюсаренко Н. В.</b> Эффективность резонансного переноса энергии в бинарных системах под действием температуры.....	115
<b>Кузьменко Н. К., Логунов Л. С., Колобкова Е. В., Никонов Н. В., Макаров С. В.</b> Получение обратимой записи в стекле, содержащем прекурсоры перовскита, под воздействием фемтосекундного лазерного излучения.....	116
<b>Кузьмин Е. В., Римская Е. Н., Данилов П. А., Кудряшов С. И.</b> Оптические азотные центры в природных розовых алмазах.....	117
<b>Кузьмин Н. Н., Болдырев К. Н., Мальцев В. В., Митина Д. Д., Дейнеко Д. В., Волкова Е. А., Копорулина Е. В., Жилиева А. И.</b> Люминесцентные свойства $\text{LuAl}_3(\text{BO}_3)_4:\text{Dy, Tm}$ и $\text{LaMgB}_5\text{O}_{10}:\text{Tb, Eu}$ .....	118
<b>Кулешова К. В., Субботин К. А., Титов А. И., Соломатина В. А., Хомяков А. В., Пакина Е. Р., Яковлев В. А., Валяев Д. Т., Зыкова М. П., Диденко Я. С., Лис Д. А., Гречишин М. Б., Батыгов С. Х., Аветисов И. Х.</b> Влияние случайных примесей на спектроскопические свойства кристаллов $\text{ZnWO}_4$ .....	119
<b>Курочкин В. Л.</b> Спутниковая квантовая криптография.....	120
<b>Куртина Д. А., Васильев Р. Б.</b> Экситонные свойства хиральных атомарно-тонких наноструктур $\text{CdSe}$ .....	121
<b>Куц Р. И., Белоусов Д. А., Корольков В. П.</b> Исследование пространственного разрешения технологии прямой лазерной записи с использованием двуслойной пленки $\alpha\text{-Si/Cr}$ .....	122
<b>Лазарева Н. Л., Дресвянский В. П., Кобелева С. В., Белякова А. М., Степаненков В. Е., Ракевич А. Л., Русинек О. Т., Купчинский А. Б., Мартынович Е. Ф.</b> Люминесценция планктона озера Байкал.....	123
<b>Левковская В. М., Харитонов А. В., Харинцев С. С.</b> Нарушение принципа взаимности в метаматериалах с пространственно-временной неоднородностью для задач передачи и обработки информации.....	125
<b>Лепеха С. В., Васильев Е. А., Зеденизов Д. А.</b> Системы люминесценции в алмазе на 489 нм.....	126
<b>Липатов Е. И., Попова А. С.</b> Перспективы применения синтетического алмаза в электронике и фотонике.....	127
<b>Лозинг Н. А., Смирнова Е. А., Глудуш М. Г.</b> Медленное переключение интенсивности флуоресценции ансамбля квантовых излучателей в диэлектрической матрице.....	128
<b>Лосев В. Ф., Зятиков И. А.</b> Генерация когерентного излучения на ионах молекулярного азота в воздушной лазерной плазме.....	129

<b>Лубенко Д. М., Прокопьев В. Е.</b> Уширение спектра фемтосекундного лазерного импульса при его распространении в газовой среде.....	130
<b>Лыга О. И., Шулепов М. А.</b> Определение температурных зависимостей спектров фотолуминесценции NV-центров алмазов под действием приложенного магнитного поля.....	131
<b>Макаров А. О., Вишняков В. И., Бражников Д. В., Бонерт А. Э., Гончаров А. Н.</b> Развитие методов ханле и белла-блума для высокочувствительной квантовой магнитометрии.....	132
<b>Макарова Д. А., Низамутдинов А. С., Буглак А. А., Телегина Т. А.</b> Фотоокисление тетрагидроптерина в различных условиях.....	133
<b>Максимова Н. Т., Мирошник Д. Д., Евдокимова А. И.</b> Новые центры окраски коротковолнового диапазона во фторидах натрия и лития.....	134
<b>Мальчукова Е. В., Левицкий В. С., Тюрина Н. Г., Тюрина З. Г.</b> О влиянии собственных дефектов боросиликатных стекол, содержащих редкоземельные ионы, на их структурные и оптические свойства.....	135
<b>Мартынович Е. Ф., Дресвянский В. П.</b> Единичные центры окраски в широкозонных кристаллах.....	136
<b>Владиминова Е. А., Кузьменко И. П., Мартынович Е. Ф.</b> Экспериментальное исследование переходных процессов в твердотельном микрочип-лазере с диодной накачкой с выходом на второй гармонике.....	138
<b>Глазунов Д. С., Мартынович Е. Ф.</b> Генерация эксилампамми импульсов излучения, необходимых для исследования кинетики длительной люминесценции.....	139
<b>Минибаев А. И., Харитонов А. В., Харинцев С. С.</b> Материалы с временной неоднородностью для управления оптическими полями.....	140
<b>Миронов В. П.</b> Сверхлюминесценция N3-центров в алмазе.....	141
<b>Калинушкин В. П., Миронов С. А., Гладилин А. А., Сторожевых М. С., Уваров О. В.</b> Двухфотонная конфокальная микроскопия – метод исследования структурных дефектов в объеме полупроводникового кристалла.....	142
<b>Зенов К. Г., Карапузиков А. И., Мирошниченко М. Б., Нехорошева Е. Г.</b> Оптимизация спектра излучения малогабаритного CO <sub>2</sub> лазера для оптико-акустического газоанализатора SF <sub>6</sub> .....	143
<b>Михайлов Ю. В., Липатьева Т. О., Федотов С. С., Зиятдинова М. З., Глебов И. С., Сигаев В. Н., Липатьев А. С.</b> Лазерное формирование люминесцирующих центров в объеме нанопористого стекла, допированного висмутом.....	144
<b>Молчанова А. Д., Болдырев К. Н., Попова М. Н.</b> Температурная зависимость спектров люминесценции центров Mn в YAl <sub>3</sub> (BO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> :Mn.....	145
<b>Морозов С. В.</b> Исследование механизмов межзонной релаксации неравновесных носителей заряда в гетероструктурах с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe для лазеров и приемников среднего ИК диапазона.....	146

<b>Мурзин С. В., Кузнецов А. В., Мартынович Е. Ф., Дресвянский В. П.</b> Эффективность формирования люминесцирующих дефектов в кристаллах LiF при различных условиях фемтосекундного лазерного возбуждения.....	148
<b>Кудряшов С. И., Мушкарина И. Н.</b> Запись фотолюминесцентных микробитов в объеме диэлектрических кристаллов ультракороткими лазерными импульсами для задач архивирования.....	150
<b>Мясникова А. С., Богданов А. И.</b> Особенности расчета ионов редкоземельных элементов в галоидных кристаллах.....	151
<b>Наседкин Б. А., Киселев Ф. Д., Чистяков В. В., Исмагилов А. О., Цыпкин А. Н., Гайдаш А. А., Козубов А. В., Егоров В. И.</b> Уязвимости волоконно-оптических компонент систем квантового распределения ключей.....	152
<b>Олейникова Е. И., Пудовкин М. С., Морозов О. А., Кораблева С. Л.</b> Спектрально-кинетическая характеристика люминофоров $\text{LiYXGd}_1\text{-XF}_4$ И $\text{LiGdF}_4$ : $\text{Eu}^{3+}$ для целей квантовой электроники и сенсорики.....	153
<b>Осадченко А. В., Дайбаге Д. С., Захарчук И. А., Селюков А. С., Амброзевич С. А., Лобанов А. Н., Рыжов А. В., Певцов Н. В., Певцов Д. Н.</b> Квантовый выход новых координационных соединений европия с $\beta$ -дикетонами и карбоновыми кислотами.....	154
<b>Остапив А. Ю., Цыпкин В. П., Иванов Г. Ю., Ларионов И. А., Тыртышный В. А., Коняшкин А. В.</b> Взаимное влияние процессов одномодового и межмодового четырёхволнового смешения в маломодовом оптическом волокне.....	155
<b>Субботин К. А., Титов А. И., Павлов С. К., Волков П. А., Лис Д. А., Díaz F., Griebner U., Лойко П. А., Solé R. M., Petrov V., Aguiló M., Mateos X.</b> Спектральные, лазерные генерационные и термомеханические свойства кристалла $\text{Yb,Li:ZnWO}_4$ .....	156
<b>Парфёнова Е. В., Слюсаренко Н. В., Слюсарева Е. А., Кулагин С. В., Кукушкина М. Л.</b> Фотофизические свойства люминофоров на основе 3-(1,3-бензотиазол-2-ил)-4-гидроксibenзолсульфокислоты.....	157
<b>Переседова Д. А., Рипенко В. С., Крылов А. А., Бураченко А. Г.</b> Импульсная катодолюминесценция алмазов, содержащих различные азот-вакансионные комплексы.....	158
<b>Петрова О. Б., Бутенков Д. А., Бакаева А. В., Рунина К. И.</b> Стабилизация кубической фазы фторида свинца при кристаллизации фтороборатных стекол, солегирированных Nd/La, Eu/Gd и Er/Lu.....	158
<b>Поломошнова Д. А., Сабаяев Т. Д., Вуколов А. В., Пайгин В. Д., Шкитов Д. А.</b> Измерение катодолюминесценции от кубического диоксида циркония при прохождении электронного пучка с энергией 5,7 МэВ.....	159

<b>Попова А. С., Липатов Е. И.</b> Спектры краевой фотолюминесценции беспримесного алмаза в различных температурных и энергетических диапазонах.....	160
<b>Пошакинский А. В., Ильин Д. И., Поддубный А. Н., Иорш И. В.</b> Генерация запутанных фотонов ансамблем динамически модулированных квантовых излучателей в волноводе.....	162
<b>Протасова Е. А., Ракевич А. Л., Липатъев А. С., Сигаев В. Н., Мартынович Е. Ф.</b> Контраст и отношение сигнал/шум для фотографических материалов с люминесцентной визуализацией изображения.....	163
<b>Пучикин А. В., Панченко Ю. Н., Коновалов И. Н., Андреев М. В., Прокопьев В. Е.</b> Взаимодействие диоксида азота с лазерным излучением 222 нм.....	164
<b>Раджабов Е. А., Козловский В. А., Панкратов В., Шендрик Р. Ю., Мясникова А. С.</b> Радиационные центры в кристаллах $\text{CaSrBaF}_6$ .....	165
<b>Рипенко В. С., Бураченко А. Г., Переседова Д. А., Крылов А. А., Артемов К. П., Вуколов А. В., Липатов Е. И.</b> Краевая люминесценция малопримесных алмазов под действием сильноточных и микротронных пучков.....	166
<b>Рогова А. В., Зангеева С. В., Кудрявцев А. Н., Красицкая В. В., Франк Л. А., Томилин Ф. Н.</b> Оптические свойства фуримазина в целлентеразин-связывающем белке.....	166
<b>Романенко Г. А., Панкин П. С., Бузин Д. С., Максимов Д. Н., Сутормин В. С. Краснов А. И., Зеленев Ф. В., Масюгин А. Н., Неделин С. В., Золотовский Н. А., Тамбасов И. А., Волочаев М. Н., Тимофеев И. В.</b> Управление добротностью металл-диэлектрического оптического микрорезонатора.....	168
<b>Рунина К. И., Попкова Л. В., Аветисов Р. И., Петрова О. Б., До Динь Чунг, Та Тху Чанг</b> Исследование устойчивости люминесцентных гибридных материалов на основе $\text{CaF}_2$ и 8-оксихинолята лития в условиях тропического климата.....	169
<b>Рупасов А. Е., Кудряшов С. И., Богацкая А. В.</b> Прямая лазерная запись в объеме прозрачных диэлектриков.....	170
<b>Сайдазимов И. А., Грищенко Б. П.</b> Синтез YAG:Ce керамики в поле радиации.....	171
<b>Самборский А. В., Раджабов Е. А.</b> Тремодеполяризация фторидов легированных примесями трёхвалентных лантаноидов.....	172
<b>Светличный В. А., Реутова О. А., Фахрутдинова Е. Д., Харламова Т. С. Водянкина О. В.</b> Лазерный синтез сложных наноструктур на основе диоксида титана для фотокаталитической генерации водорода и переработки биосырья.....	173
<b>Седов В. С., Мартъянов А. К., Тяжелов И. А., Ральченко В. Г., Нелюбов А. Ю., Наумов А. В.</b> Узкополосная фотолюминесценция центров окраски Олово-Вакансия в CVD-алмазных микрокристаллах...	174

<b>Седых Н. М.</b> Расчет токсичности мономера и полимера ионной жидкости .....	175
<b>Седых Н. М., Сухов Б. Г., Чеснокова А. Н., Иванов Н. А.</b> Придание протонпроводящих свойств диэлектрической трековой мембране за счет полимеризации ионной жидкости с подвижным протоном в трековых порах .....	176
<b>Сектаров Э. С., Болдырев К. Н.</b> Исследование а-полосы в алмазе методом рентгенолюминесценции .....	177
<b>Сёмина П. Н.</b> О механизмах запуска апоптоза клеток злокачественных новообразований с использованием биоконъюгатов магнитных наночастиц и режима негреющего магнитного поля .....	178
<b>Бодров С. Б., Корытин А. И., Сергеев Ю. А., Степанов А. Н.</b> Влияние ТГц поля на люминесценцию в GaAs .....	179
<b>Серкина К. С., Волкова Д. В., Трофимова А. А., Рунина К. И., Степанова И. В.</b> ИК-люминесценция висмутгерманатных стекол, модифицированных натрием .....	180
<b>Серкина К. С., Жегучева Ю. В., Рунина К. И., Степанова И. В.</b> Люминесцентные свойства германатных стекол, легированных висмутом, эрбием, иттербием .....	181
<b>Серкина К. С., Король А. В., Ефимочкина А. В., Рунина К. И., Степанова И. В.</b> Влияние легирования оксидом тулия на люминесцентные свойства висмутгерманатных стекол .....	182
<b>Симонова В. А., Бычков А. С., Залозная Е. Д., Карабутов А. А.</b> Применение лазерного ультразвукового метода для диагностики напряжений в материалах, полученных с помощью аддитивных технологий .....	183
<b>Слюсарева Е. А.</b> Органические люминофоры с фотоиндуцированным переносом заряда: оптические свойства и применение .....	184
<b>Слюсаренко Н. В., Герасимова М. А., Парфёнова Е. В., Слюсарева Е. А.</b> Влияние температуры на фотолюминесценцию квантовых точек CdSe/ZnS В биополимерном композите с эритрозином В .....	185
<b>Holler J., Korn T., Смирнов Д. С.</b> Долинный магнитофононный резонанс в скрученных бислоях дихалькогенидов переходных металлов .....	186
<b>Смирнова Е. А., Лозинг Н. А., Глуш М. Г.</b> Диполь-дипольные взаимодействия в оптических спектрах двух спутанных излучателей .....	187
<b>Степанов Ф. А., Миронов В. П., Ракевич А. Л., Мартынович Е. Ф.</b> Особенности температурных зависимостей в области люминесценции S2 системы в алмазе .....	188
<b>Стрекалов П. В., Марзаева И. И., Рунина К. И., Маякова М. Н., Петрова О. Б.</b> Исследование спектрально-люминесцентных свойств гибридных материалов в системе фторида стронция с 8-оксихинолятом лития полученных методом соосаждения .....	189



<b>Субботин К. А., Лис Д. А., Титов А. И., Алимов О. К., Жариков Е. В.</b> УФ → ИК даун-конверсия излучения в кристаллах шеелитоподобных молибдатов и вольфратов, легированных ионами Yb .....	190
<b>Суржикова Д. П., Слюсарева Е. А.</b> Механизмы влияния на температурный флуоресцентный сигнал флуоресцеина .....	191
<b>Суровцева В. П., Коваленко Н. В., Рябушкин О. А.</b> Оптический когерентный томограф с усилением отраженного сигнала в активном волокне.....	192
<b>Сухов Б. Г., Трофимов Б. А., Regdel D.</b> Гибридные неорганико-органические нанобиокмозиты как платформы для междисциплинарных исследований и технологий .....	193
<b>Конькова Т. В., Сухов Б. Г.</b> Ферментокаталитический синтез электропроводящего полипиррола.....	195
<b>Конькова Т. В., Клущина Н. В., Евсеев И. Д., Сухов Б. Г.</b> Бор-, гадолиний-содержащие нанобиокмозиты для многоканальной терапии.....	195
<b>Тайченачев А. В., Юдин В. И.</b> Обобщенные рамсеевские методы в прецизионной лазерной спектроскопии: от атомных часов до интерферометров.....	197
<b>Тарасевич А. О., Еремчев И. Ю., Князева М. А., Ли Дж., Наумов А. В., Щелькин И. Г.</b> Статистика фотонов замедленной люминесценции одиночных субмикронных кристаллов перовскитов $\text{MAPbI}_3$ .....	198
<b>Теренин С. Ю., Зимин М. Д., Жабоедов А. П., Непомнящих А. И., Шендрик Р. Ю.</b> Определение концентрации воды в минеральном кварцевом сырье методом ИК-спектроскопии .....	199
<b>Титов А. И., Субботин К. А., Лис Д. А., Чернова Е. В., Лис О. Н., Кулешова К. В., Диденко Я. С., Зимица Ю. И., Жариков Е. В.</b> Даун-конверсионная люминесценция Yb в кристаллах $\text{CaWO}_4$ , синтезированных в различных окислительно-восстановительных условиях...200	200
<b>Томилиа Ф. Н., Рогова А. В., Парфёнова Е. В., Слюсаренко Н. В., Слюсарева Е. А.</b> Моделирование оптических свойств люминофоров 3-(1,3-бензотиазол-2-ил)-4-гидроксibenзолсульфокислоты .....	201
<b>Трифанова Е. М., Николаева М. Е., Свиридов А. П., Попов В. К.</b> Трансформация спектров фотолюминесценции апконвертирующих наночастиц фантомами биологических тканей .....	202
<b>Трофимова К. Е., Ищенко А. В., Иргашев Р. А., Вайнштейн И. А.</b> Новые соединения на основе бензотиеноаценов: электрические свойства и квантовый выход люминесценции .....	203
<b>Фадеев М. А., Дубинов А. А., Разова А. А., Янцер А. А., Уточкин В. В., Румянцев В. В., Алешкин В. Я., Шенгуров Д. В., Морозова Е. Е., Михайлов Н. Н., Дворецкий С. А., Гавриленко В. И., Морозов С. В.</b> Стимулированное излучение и лазерная генерация в гетероструктурах на основе $\text{HgCdTe}$ в диапазоне 3–5 мкм .....	204

<b>Федорова И. А., Юров В. Ю., Большаков А. П., Мартянов А. К., Ральченко В. Г.</b> Оптическая эмиссионная спектроскопия микроволновой плазмы в смесях $H_2-CH_4-GeH_4$ в процессе легирования алмаза германием для создания центров окраски $GeV$ .....	206
<b>Французов П. А.</b> Долговременные флуктуации интенсивности люминесценции наноразмерных частиц.....	207
<b>Фролова А. С., Ракевич А. Л., Мартынович Е. Ф.</b> Спектроскопия центров, индуцированных лазерным излучением в кристалле $KCl-Tl_2SO_4$ .....	207
<b>Харисова Р. Д., Бабкина А. Н., Зырянова К. С.</b> Влияние температуры на поглощение смешанных нанокристаллов перовскитов $CsPb(Br_xI_{1-x})_3$ в борогерманатной матрице .....	208
<b>Хецева М. С., Болдырев К. Н., Каримуллин К. Р., Кожина Е. П., Бедин С. А., Калимуллина А. Р., Курмалеев Д. Р., Наумов А. В.</b> Методы лазерной физики в исследовании запрещенных в спорте фармпрепаратов.....	209
<b>Хребтов А. А., Федоренко Е. В., Мирочник А. Г.</b> Эксимерная замедленная флуоресценция $\beta$ -дикетонатов дифторида бора в полимерной матрице .....	211
<b>Чан Н. Д., Полисадова Е. Ф.</b> Фотолюминесценция алюмомагневой шпинели $MgAl_2O_4:Mn$ , синтезированной радиационным методом.....	212
<b>Чащин В. В., Липатов Е. И.</b> Моделирование просветляющих покрытий на основе одномерных фотонных кристаллов со сверхрешетками.....	214
<b>Черненко А. А.</b> Эффекты магнитной когерентности (интерференции) уровней, индуцированные полем волны линейной поляризации, в спектрах насыщенного поглощения и магнитного сканирования в атомах с $\Lambda$ - и $V$ - типом переходов .....	215
<b>Чернов А. Н., Хмелев А. В., Курочкин В. Л.</b> Оптимизированное восстановление частоты следования спутникового квантового сигнала.....	216
<b>Чечёкина О. Г., Болдырев К. Н.</b> Машинное обучение для изучения FTIR-спектров биологических образцов .....	217
<b>Овчинников О. В., Смирнов М. С., Гревцева И. Г., Возгорькова Е. А., Чирков К. С.</b> Управление спектрально-люминесцентными свойствами квантовых точек $Ag_2S$ и $PbS$ при их бинарной ассоциации.....	218
<b>Шакиров А. А., Низамутдинов А. С., Горшкова Е. А., Шавельев А. А., Семашко В. В.</b> Фотоионизация ионов $Yb^{3+}$ в кристаллах $LiCaAlF_6:Ce^{3+}Yb^{3+}$ .....	219
<b>Шамирзаев Т. С.</b> Оптическая ориентация и динамическая спиновая поляризация электронов в непрямозонных квантовых точках.....	220
<b>Шамшурин А. В., Слабко В. В., Кузоватов И. А.</b> О возможности усиления света селективно по состояниям ориентированными импульсным полем молекулами.....	221

<b>Шендрик Р. Ю., Чуканов Н. В., Вигасина М. Ф., Сапожников А. Н., Канева Е. В., Радомская Т. А., Пеков И. В.</b> Оптическая спектроскопия внекаркасных компонентов в микропористых материалах со структурой содалита и канкринита .....	222
<b>Шилов А. О., Камалов Р. В., Вохминцев А. С., Вайнштейн И. А.</b> Особенности люминесцентного отклика наноструктур анодного диоксида гафния .....	223
<b>Шиндякин Е. В., Уваров А. С., Непомнящих А. И., Бобина Н. С., Платонов В. К.</b> Применение термолюминесцентных детекторов ДТГ-4 для измерения поверхностной дозы при проведении лучевой терапии .....	224
<b>Щепина Л. И., Иванов Н. А., Ерофеева В. А., Ружников Л. И.</b> Фотолюминесценция с квазибелым спектром в кристаллах LiF-UO <sub>2</sub> с центрами окраски .....	225
<b>Энтин В. М., Бражников Д. В., Рябцев И. И.</b> Применение метода двойного радиооптического резонанса в конфигурации ханле в ячейке с рубидием и буферным газом для регистрации слабых микроволновых полей .....	226

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

**A**

Aguiló M. 156  
Aguiló M. 92

**B**

Baalbaki H. 10  
Beterov I. I. 3  
Borisov A. V. 10  
Bukhtsoozh O. 4

**C**

Camy P. 92

**D**

Davaasambuu J. 4  
Díaz F. 156  
Díaz F. 92

**E**

Elabedine G. Z. 92  
Eremeev K. 92

**F**

Farouk A. M. 3  
Feng M. 6  
Frolova A. S. 4

**G**

Griebner U. 156

**H**

Holler J. 186  
Huang W. 6

**I**

Iyushin B. B. 6, 7

**K**

Kistenev Yu. V. 10  
Korn T. 186  
Krivova N. A. 10

**L**

Lopez Guardado D. A. 10

**M**

Martynovich E. F. 4

Mateos X. 92, 156

**P**

Pervunin K. S. 6, 7  
Petrov V. 156

**R**

Regdel D. 193  
Ryabtsev I. I. 3

**S**

Samarinova A. 10  
Sang X. 6  
Severin A. S. 6, 7  
Solé R. M. 92, 156  
Song F. 6, 8, 9

**U**

Ulziybayar E. 4  
Unurbileg D. 4

**X**

Xu P. 3, 6

**Y**

Yang J. 6, 8

**Z**

Zakharova O. A. 10  
Zhao Z. 6, 9  
Zuhayri H. A. 10

**A**

Абрамкин Д. С. 12, 13  
Авдеев И. Д. 14  
Аветисов И. Х. 119  
Аветисов Р. И. 169  
Аграфонов Ю. В. 16  
Адуев Б. П. 18  
Аксенова Ю. В. 25  
Александров И. А. 13  
Алексеев С. В. 17  
Алешкин В. Я. 204  
Алимов О. К. 75, 76, 190  
Алукер Н. Л. 18  
Амбарникова Н. В. 19  
Амброзевич С. А. 70, 89, 154

Андреев М. В. 164

Аникеева В. Е. 21  
Аржанов А. И. 104  
Артамонов А. С. 18  
Артемов К. П. 47, 166  
Архипкин В. Г. 23, 72, 99  
Асланов С. В. 65, 73  
Асташкина М. С. 65  
Астраханцева А. В.  
Атучин В. В. 12  
Ашмарина М. В. 25

**B**

Бабкина А. Н. 26, 208  
Баданов Р. Н. 63  
Бадиков Д. В. 84, 85  
Бакаева А. В. 48, 158  
Баранова Е. В. 84, 85  
Барбышев К. А. 27  
Барышников В. И. 28, 29, 30, 64  
Батталова Э. И. 31  
Батыгов С. Х. 119  
Бедин С. А. 209  
Беднякова А. Е. 83  
Безверхняя Д. М. 33  
Безлепкина Н. П. 32  
Безлер И. В. 16  
Белоусов Д. А. 122  
Белякова А. М. 123  
Бердников В. С. 34, 35, 36  
Блошкин А. А. 12  
Бобина Н. С. 224  
Богацкая А. В. 170  
Богданов А. И. 151  
Богомолов Д. Б. 12  
Бодров С. Б. 179  
Бойко А. А. 83, 84, 85  
Бойченко С. В. 37  
Болдырев К. Н. 21, 24, 38, 39, 118, 145, 177, 209, 217  
Болдырев Н. Ю. 38  
Большаков А. П. 206  
Бонерт А. Э. 132  
Бородулин З. И. 41, 50  
Бочарникова Е. Н. 42

Бражников Д. В. *132, 226*  
 Брюквина Л. И. *43, 44*  
 Бубыр Е. В. *82*  
 Буглак А. А. *133*  
 Будкин Г. В. *45*  
 Бузин Д. С. *46, 168*  
 Бураченко А. Г. *47, 111, 158, 166*  
 Бутенков Д. А. *48, 158*  
 Бычков А. С. *183*

**В**

Вайнштейн И. А. *203, 223*  
 Вакалов Д. С. *87*  
 Валяев Д. Т. *119*  
 Васев А. В. *12*  
 Васильев Е. А. *126*  
 Васильев Р. Б. *49, 70, 121*  
 Васильева Л. А. *41, 50*  
 Вербоватый Д. М. *84, 85*  
 Ветров С. Я. *46*  
 Вигасина М. Ф. *222*  
 Винокуров В. А. *34*  
 Винокуров В. В. *34*  
 Винс В. Г. *59*  
 Витухновский А. Г. *52*  
 Вишняков В. И. *132*  
 Владимирова Е. А. *138*  
 Водянкина О. В. *173*  
 Возгорькова Е. А. *218*  
 Войтенко Д. С. *53*  
 Волков П. А. *74, 92, 156*  
 Волкова Д. В. *180*  
 Волкова Е. А. *118*  
 Волокитина А. В. *54*  
 Волочаев М. Н. *46, 168*  
 Волошин Г. В. *55*  
 Воронов В. В. *75, 76*  
 Вострикова Л. И. *56*  
 Voxминцев А. С. *223*  
 Вуколов А. В. *159, 166*  
 Вуколов А. В. *47*  
 Высоцкий Е. С. *98*  
 Вьюнышев А. М. *72, 98, 99*  
 Вьюнышева С. А. *98*  
 Вяткин Е. С. *57*

**Г**

Гавриленко В. И. *204*

Гайдаш А. А. *152*  
 Гармышева Т. Ю. *58*  
 Генин Д. Е. *59, 60, 96*  
 Герасимова М. А. *61, 185*  
 Гермогенов В. П. *50*  
 Гладилин А. А. *142*  
 Гладкочуб Д. П. *66*  
 Гладуш М. Г. *128, 187*  
 Глазунов Д. С. *82, 139*  
 Глебов И. С. *144*  
 Голубовская А. Г. *62*  
 Гончаров А. Н. *132*  
 Гончарова Д. А. *54*  
 Горева О. В. *63, 64*  
 Горшкова Е. А. *219*  
 Графова В. П. *49*  
 Гревцева И. Г. *218, 65*  
 Гречишин М. Б. *119*  
 Григоров Я. И. *66*  
 Гриценко Б. П. *171*  
 Грициенко А. В. *52*  
 Гришков В. А. *34*  
 Гулина Ю. С. *67*  
 Гупалов С. В. *14*  
 Гурьев Д. А. *87*

**Д**

Давлетшин Н. Н. *98*  
 Давыдов Е. И. *68*  
 Дайбаге Д. С. *154, 70, 89*  
 Данилкин М. И. *52, 89*  
 Данилов Б. С. *66*  
 Данилов П. А. *117, 71*  
 Дармаев Э. Ч. *72*  
 Дворецкий С. А. *204*  
 Дегтяренко К. М. *97*  
 Дейнеко Д. В. *118*  
 Дерепко В. Н. *73*  
 Диденко Я. С. *92, 119, 200, 74*  
 До Динь Чунг *169*  
 Добрецова Е. А. *75, 76, 87*  
 Докудовская А. К. *77*  
 Домаров Е. В. *19*  
 Дормидонов А. Е. *78, 88*  
 Дресвянский В. П. *101, 108, 123, 136, 148, 79, 68*  
 Дубинов А. А. *204*  
 Дудаев М. А. *63*  
 Дуплинский А. В. *27*

Дурнев М. В. *45*

**Е**

Евдокимова А. И. *134*  
 Евсеев И. Д. *195*  
 Егоров В. И. *152*  
 Егранов А. В. *81*  
 Елисеев А. П. *59*  
 Емельянов Е. А. *12*  
 Емельянова А. С. *82*  
 Еремеева Е. В. *98*  
 Еремчев И. Ю. *198*  
 Ерофеева В. А. *225*  
 Ерушин Е. Ю. *83, 84, 85*  
 Есин М. Ю. *12*  
 Ефимочкина А. В. *182*

**Ж**

Жабоедов А. П. *199*  
 Жариков Е. В. *190, 200*  
 Жегучева Ю. В. *181*  
 Жилин М. А. *86*  
 Жилиева А. И. *118*  
 Жмыхов В. Ю. *87*

**З**

Залозная Е. Д. *183, 78, 88*  
 Зангеева С. В. *166*  
 Захарчук И. А. *154, 70, 89*  
 Звягин А. И. *90, 91*  
 Зедгенизов Д. А. *126*  
 Зеленов Ф. В. *168, 46*  
 Зенов К. Г. *143*  
 Зилов С. А. *108*  
 Зимин М. Д. *199*  
 Зиминова Ю. И. *200, 92*  
 Зиятдинова М. З. *144*  
 Золотовский Н. А. *168*  
 Зыкова М. П., *74*  
 Зыкова С. С. *93*  
 Зырянова К. С. *208, 26*  
 Зятиков И. А. *129*

**И**

Иванов Г. Ю. *155*  
 Иванов Н. А. *176, 225, 43*  
 Ивкина О. В. *89*  
 Ивченко Е. И. *94*  
 Избасарова Э. А. *95*  
 Измайлов И. В. *59, 96*

Измайлова Н. В. 97  
 Иконников Д. А. 72, 98, 99  
 Ильенков Р. Я. 100, 105  
 Ильин Д. И. 162  
 Илюшин П. Я. 71  
 Иорш И. В. 162  
 Иргашев Р. А. 203  
 Исмагилов А. О. 152  
 Ищенко А. В. 203, 101

## К

Казаков Л. В. 82  
 Казанцева А. В. 102  
 Казаринова Д. Д. 103  
 Калимуллина А. Р. 209  
 Калинушкин В. П. 142  
 Камалов Р. В. 223  
 Кандидов В. П. 78, 88  
 Канева Е. В. 222  
 Карабутов А. А. 183  
 Карапузиков А. И. 143, 86  
 Каримуллин К. Р. 104, 209  
 Каргашов И. А. 56  
 Кирпичникова А. А. 100, 105  
 Киселев Ф. Д., 152  
 Кислицын С. А. 34, 35  
 Клушина Н. В. 195  
 Князева М. А. 198  
 Кобелева С. В. 123  
 Ковалев М. С. 106  
 Коваленко Н. В. 192  
 Кожина Е. П. 209  
 Козловский В. А. 165  
 Козубов А. В. 152  
 Колесников И. Е. 106  
 Колесникова Т. А. 64  
 Колобкова Е. В. 116  
 Кольмагин Д. А. 52  
 Компанец В. О. 78, 88  
 Коновалов И. Н. 164  
 Конькова Т. В. 195  
 Конькова Т. В. 195  
 Конашкин А. В. 103, 155  
 Копорулина Е. В. 118  
 Коптев Е. С. 12  
 Кораблева С. Л. 153, 77  
 Король А. В. 182

Корольков В. П. 122  
 Корыгин А. И. 179  
 Костюкова Н. Ю. 83, 84, 85  
 Красин Г. К. 107, 67  
 Красицкая В. В. 166  
 Краснов А. И. 168  
 Кривошеев Н. Д. 108  
 Крутикова И. В. 110  
 Крылов А. А. 111, 158, 166, 47  
 Кудрявцев А. Н. 166  
 Кудряшов С. И. 106, 107, 112, 117, 150, 170, 67  
 Кузнецов А. В. 112, 148  
 Кузнецов А. В. 113  
 Кузнецов С. В. 24, 87  
 Кузнецова Д. О. 115  
 Кузоватов И. А. 221  
 Кузьменко И. П. 138  
 Кузьменко Н. К. 116, 26  
 Кузьмин Е. В. 117, 67  
 Кузьмин Н. Н. 118  
 Кукушкина М. Л. 157  
 Кулагин С. В. 157  
 Кулешова К. В. 119, 200  
 Кульпина Е. В. 26  
 Купчинский А. Б. 123  
 Курапцев А. С. 55  
 Курмалеев Д. Р. 209  
 Курочкин В. Л. 120  
 Курочкин В. Л. 216, 27, 94  
 Курочкин М. А. 106  
 Куртина Д. А. 121, 49  
 Куц Р. И. 122

## Л

Лазарева Н. Л. 123  
 Ларионов И. А. 155  
 Лебедев А. И. 49  
 Левицкий В. С. 135  
 Левковская В. М. 125  
 Лепеха С. В. 126  
 Ли Дж. 198  
 Липатов Е. И. 111, 127, 160, 166, 214, 47, 50, 53, 59, 60, 96, 144, 163  
 Липатьева Т. О. 144  
 Липко С. В. 43

Лис Д. А. 119, 156, 190, 200, 74, 92  
 Лис О. Н. 200  
 Лисицын В. М. 19  
 Лобанов А. Н. 154  
 Логунов Л. С. 116  
 Лозинг Н. А. 128, 187  
 Лойко П. А. 156, 92  
 Лосев В. Ф. 129, 17  
 Лубенко Д. М. 130  
 Лыга О. И. 131  
 Лячин А. В. 96

## М

Магарян К. А. 104  
 Макаров А. О. 132  
 Макаров С. В. 116  
 Макарова Д. А. 133  
 Максимов Д. Н. 168, 46  
 Максимова Н. Т. 134  
 Мальцев В. В. 118  
 Мальчукова Е. В. 135  
 Мамонова Д. В. 106  
 Марзаева И. И. 189  
 Мартынович Е. Ф. 101, 108, 123, 136, 138, 139, 148, 163, 188, 207, 66, 68, 79, 82  
 Мартынов А. К. 174, 206  
 Масюгин А. Н. 168, 46  
 Матяев И. Д. 71  
 Маякова М. Н. 189  
 Минибаев А. И. 140  
 Миронов В. П. 141, 188, 82  
 Миронов С. А. 142  
 Мирочник А. Г. 211  
 Мирошник Д. Д. 134  
 Мирошниченко И. Б. 83  
 Мирошниченко М. Б. 143  
 Митин К. А. 34, 35, 36  
 Митина А. В. 36  
 Митина Д. Д. 118  
 Михайлов А. В. 34, 35  
 Михайлов Н. Н. 204  
 Михайлов Ю. В. 144  
 Молчанова А. Д. 145  
 Морозов О. А. 153, 77  
 Морозов С. В. 146, 204  
 Морозова Е. Е. 204

Мосягина И. В. 89  
 Мурзин С. В. 148  
 Мурзина Ю. А. 29, 64  
 Мушкарина И. Н. 15  
 Мысливец С. А. 23, 72, 98, 99  
 Мясникова А. С. 151, 165

## Н

Наболь С. В. 46  
 Наседкин Б. А. 152  
 Наумов А. В. 104, 174, 198, 209  
 Неделин С. В. 168  
 Нелюбов А. Ю. 174  
 Непомнящих А. И. 199, 224, 58  
 Нестоклон М. О. 14  
 Нефедова К. В. 110  
 Нехорошева Е. Г. 143  
 Низамутдинов А. С. 133, 219, 24  
 Никова М. С. 87  
 Николаев А. Г. 24  
 Николаева М. Е. 202  
 Никонович О. Л. 63, 64  
 Никоноров Н. В. 116  
 Нурмухамедов Д. С. 18

## О

Овчинников О. В. 218, 65, 73, 90, 91  
 Олейникова Е. И. 153, 77  
 Осадченко А. В. 154, 70, 89  
 Остапив А. Ю. 155

## П

Павлов И. Н. 98  
 Павлов С. К. 156, 74  
 Пайгин В. Д. 159  
 Пакина Е. Р. 119  
 Паклин А. С. 58  
 Панкин П. С. 168, 46  
 Панкратов В. 165  
 Панченко Ю. Н. 164  
 Паперный В. Л. 101, 30  
 Парфёнова Е. В. 157, 185, 201  
 Певцов Н. В. 154

Певцов Д. Н. 154  
 Пеков И. В. 222  
 Переседова Д. А. 111, 158, 166  
 Петрова О. Б. 158, 169, 189, 48, 93  
 Петровский А. Ф. 68  
 Петрушин И. С. 16  
 Петрушков М. О. 12  
 Писаренко А. В. 52  
 Платонов В. К. 224  
 Поддубный А. Н. 162  
 Полисадова Е. Ф. 19, 212  
 Поломошнова Д. А. 159  
 Помазкин Д. А. 71  
 Попкова Л. В. 169  
 Попов А. В. 48  
 Попов В. К. 202  
 Попов П. А. 92  
 Попова А. С. 127, 160  
 Попова М. Н. 145, 38  
 Пошакинский А. В. 162, 57  
 Преображенский В. В. 12  
 Прокопьев В. Е. 130, 164  
 Прокопьев С. А. 66  
 Протасова Е. А. 163  
 Проходцов А. И. 52  
 Прудников О. Н. 100, 105  
 Прутсков Г. В. 52  
 Пудовкин М. С. 153, 77  
 Пузырёв В. Н. 33  
 Путьято М. А. 12  
 Пучикин А. В. 164

## Р

Раджабов Е. А. 165, 172  
 Радомская Т. А. 222  
 Разова А. А. 204  
 Ракевич А. Л. 123, 163, 188, 207, 66  
 Ральченко В. Г. 174, 206  
 Редюк А. А. 83  
 Реутова О. А. 173  
 Римская Е. Н. 117  
 Рипенко В. С. 111, 158, 166, 47  
 Рогова А. В. 166, 201  
 Романенко Г. А. 168, 46

Ружников Л. И. 225  
 Румянцев В. В. 204  
 Рунина К. И. 158  
 Рунина К. И. 169, 180, 181, 182, 189, 48, 93  
 Рупасов А. Е. 170  
 Русанов С. Я. 75, 76  
 Русинек О. Т. 123  
 Рыжов А. В. 154  
 Рябушкин О. А. 103, 192  
 Рябцев И. И. 226

## С

Саакян А. Т. 33  
 Сабаев Т. Д. 159  
 Саввин А. Д. 59  
 Савостьянов А. О. 104  
 Сайдазимов И. А. 171  
 Самборский А. В. 172  
 Самолов А. В. 60  
 Самсонова Л. Г. 97  
 Сапожников А. Н. 222  
 Светличный В. А. 62, 173, 54  
 Свиридов А. П. 202  
 Седов В. С. 174  
 Седых Н. М. 175, 176  
 Сектаров Э. С. 177, 39  
 Селюков А. С. 154, 70, 89  
 Семашко В. В. 219  
 Семенова О. И. 21  
 Семёмина П. Н. 178  
 Сергеев Ю. А. 179  
 Серкина К. С. 180, 181, 182, 93  
 Сигаев В. Н. 144, 163  
 Симонова В. А. 183, 78, 88  
 Скориков М. Л. 70  
 Слабко В. В. 221  
 Слюсарева Е. А. 115, 157, 184, 185, 191, 201  
 Слюсаренко Н. В. 115, 157, 185, 201  
 Смирнов Д. С. 186  
 Смирнов М. С. 218, 65, 73  
 Смирнова Е. А. 128, 187  
 Соколов И. М. 55  
 Соломатина В. А. 119  
 Степаненков В. Е. 123  
 Степанов А. Н. 179  
 Степанов Ф. А. 188

Степанова И. В. 180,  
181, 182  
Сторожевых М. С. 142  
Стрекалов П. В. 189  
Субботин К. А. 119, 156,  
190, 200, 74, 92  
Суржикова Д. П. 191  
Суровцева В. П. 192  
Сутормин В. С. 168, 46  
Сухов Б. Г. 176, 193, 195,  
195

## Т

Та Тху Чанг 169  
Тайченачев А. В. 100, 197  
Тамбасов И. А. 168  
Тарала В. А. 87  
Тарасевич А. О. 198  
Тарасенко С. А. 45, 57  
Телегина Т. А. 133  
Теренин С. Ю. 199  
Тимофеев И. В. 168, 46  
Титов А. И. 119, 156,  
190, 200, 74, 92  
Томилин Ф. Н. 166, 201  
Трифанова Е. М. 202  
Трофимов Б. А. 193  
Трофимова А. А. 180  
Трофимова К. Е. 203  
Трунов В. И. 17  
Тыртышный В. А. 155  
Тюрнина З. Г. 135  
Тюрнина Н. Г. 135  
Тютрин А. А. 66  
Тяжелов И. А. 174

## У

Уваров А. С. 224  
Уваров О. В. 142  
Уточкин В. В. 204

## Ф

Фадеев М. А. 204  
Фахрутдинова Е. Д. 173  
Федоренко Е. В. 211  
Федорова И. А. 206  
Федотов С. С. 144  
Франк Л. А. 166  
Французов П. А. 207  
Фролов С. А. 17  
Фролова А. С. 207

## Х

Халаимов Д. В. 16  
Харинцев С. С. 102, 125,  
140, 31, 95  
Харисова Р. Д. 208  
Харитонов А. В. 125, 140  
Харламова Т. С. 173  
Хецева М. С. 209  
Хмелев А. В. 216, 27, 94  
Хомяков А. В. 119  
Хребтов А. А. 211  
Хуэй Мэн 55

## Ц

Цветков В. Б. 75, 76, 87  
Цветков В. С. 75, 76, 87  
Цыпкин А. Н. 152  
Цыпкин В. П. 155

## Ч

Чайдонова В. С. 42  
Чайковская О. Н. 32, 42  
Чан Н. Д. 212  
Чащин В. В. 214  
Чевычелова Т. А. 90, 91  
Чекалин С. В. 78, 88  
Черненко А. А. 215  
Чернов А. Н. 216  
Чернова Е. В. 200  
Черных А. А. 101

Чеснокова А. Н. 176  
Чечёкина О. Г. 217  
Чжу Ц. 67  
Чикулина И. С. 87  
Чирков К. С. 218  
Чистяков В. В. 152  
Чуканов Н. В. 222

## Ш

Шабалин С. А. 82  
Шавельев А. А. 219, 24  
Шакиров А. А. 219  
Шалаев А. А. 58  
Шалин А. С. 113  
Шамирзаев Т. С. 220  
Шамшурун А. В. 221  
Шенгуров Д. В. 204  
Шендрик Р. Ю. 165, 199,  
222, 58  
Шеремет В. Г. 26  
Шилов А. О. 223  
Шиндякин Е. В. 224  
Шкитов Д. А. 159  
Шулепов М. А. 131, 41  
Шульгина М. Е. 66

## Щ

Щеблыкин И. Г. 198  
Щепина Л. И. 225

## Э

Энтин В. М. 226

## Ю

Юдин В. И. 100 197  
Юров В. Ю. 206

## Я

Яковлев В. А. 119  
Янцер А. А. 204



Научное издание

**МАТЕРИАЛЫ  
XIX МЕЖДУНАРОДНОЙ МОЛОДЕЖНОЙ  
КОНФЕРЕНЦИИ ПО ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ  
И ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКЕ**

Иркутск, Россия, 3–8 июля 2023 г.

**ISBN 978-5-9624-2169-8**

*Материалы публикуются в авторской редакции*

Компьютерный набор и верстка *С. В. Бойченко*

Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130а

Иркутский государственный университет  
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1

---

Подписано в печать 28.06.2023. Формат 60×90  
1/16 Усл. печ. л. 15,5. Тираж 220 экз. Заказ 104

---

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии Издательства ИГУ  
664084, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 124