

Научная статья
УДК 535.375.54
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.008

КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ГРАДИЕНТНОГО КРИСТАЛЛА $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$

**Николай Васильевич Сидоров¹, Александр Юрьевич Пятыхеев²,
Александр Владимирович Скрабатун³, Елена Валерьевна Строганова⁴,
Валерий Викторович Галуцкий⁵**

¹Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева
Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

^{2, 3}Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

^{4, 5}Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

Аннотация

Приведены результаты исследования колебательных спектров градиентного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ (конгруэнтный по основным компонентам, градиент Er^{3+} 0,55 ат %/см), выращенного методом Чохральского. Полученные данные сравнивались со спектрами $\text{LiNbO}_{3\text{cong}}$ ($R = [\text{Li}] / [\text{Nb}] = 0,946$) и $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ (3,1 вес %), также выращенных методом Чохральского. Обнаружено, что в градиентном кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ (конгруэнтный по основным компонентам, градиент Er^{3+} 0,55 ат %/см) интенсивность линий комбинационного рассеяния второго порядка существенно больше интенсивности фундаментальных колебаний, что обусловлено высокой микронеоднородностью градиентного кристалла. Установлено отсутствие спектра КР в геометрии рассеяния $z(xx, yy, xy)\bar{z}$, объяснения которому на данный момент не найдено. По спектрам ИК-поглощения в области валентных колебаний ОН-групп установлено, что кислородно-октаэдрические кластеры MeO_6 ($\text{Me} = \text{Li}^+, \text{Nb}^{5+}$, вакантный октаэдр V, примесный ион) структуры градиентного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ имеют форму, близкую к правильной. При этом величина $R \approx 1$ и в структуре практически отсутствуют точечные дефекты Nb_{Li} . Объемная концентрация ОН-групп в градиентном кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ почти на порядок меньше, чем в образцах для сравнения.

Ключевые слова:

ниобат лития, градиент состава, легирование, эрбий, комбинационное рассеяние, инфракрасное поглощение

Благодарности:

статья выполнена при поддержке тем MEZ-2025-0055, НИОКТР 121072300166-7, а также РНФ (грант 19-79-30086-П). Н. В. Сидоров благодарит Минобрнауки (тема FMEZ-2025-0055). А. Ю. Пятыхеев благодарит РНФ (грант 19-79-30086-П). В. В. Галуцкий и Е. В. Строганова благодарят Минобрнауки (тема FZEN-2023-0006).

Финансирование:

тема MEZ-2025-0055, НИОКТР 121072300166-7, РНФ (грант 19-79-30086-П).

Для цитирования:

Колебательная спектроскопия градиентного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ / Н. В. Сидоров и [др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 2. С. 51–55. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.008.

Original article

VIBRATIONAL SPECTROSCOPY OF GRADIENT $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ CRYSTAL

**Nikolay V. Sidorov¹, Alexander Yu. Pyatyshev², Alexander V. Skrabatun³,
Elena V. Stroganova⁴, Valeriy V. Galutskiy⁵**

¹Tananaev Institute of Chemistry—Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences” Science Centre of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

^{2, 3}P. N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^{4, 5}Kuban State University, Krasnodar, Russia

Abstract

The results of studying the vibrational spectra of the gradient $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ (congruent in the main components, the Er^{3+} gradient is 0.55 at%/cm) crystal grown by the Czochralski method are presented. The obtained data were compared with the spectra of $\text{LiNbO}_{3\text{cong}}$ ($R = [\text{Li}]/[\text{Nb}] = 0.946$) and the $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ (3.1 wt.%) crystals which were also grown by the Czochralski method. It was found that in a graded $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ crystal (congruent in terms of its main components, with an Er^{3+} gradient of 0.55 at.%/cm), the intensity of second-order Raman scattering bonds significantly exceeds the intensity of fundamental vibrations. This is due to the high microscopic

inhomogeneity of the graded crystal. The absence of the Raman spectrum in the scattering geometry $z(xx, yy, xy)\bar{z}$ was established, an explanation for which has not been found at the moment. According to the IR absorption spectra in the region of stretching vibrations of the OH⁻-groups, it was found that the oxygen-octahedral clusters MeO₆ (Me—Li⁺, Nb⁵⁺, vacant octahedron V, impurity ion) of the structure of the gradient LiNbO₃:Er³⁺ crystal have a shape close to regular. In this case, the value of $R \approx 1$, and point defects of Nb_{Li} are almost absent in the structure. The volume concentration of OH⁻-groups in the gradient LiNbO₃:Er³⁺ crystal is almost an order of magnitude less than in the samples for comparison.

Keywords:

lithium niobate, composition gradient, doping, erbium, Raman scattering, infrared absorption

Acknowledgements:

The article was supported by the topics MEZ-2025-0055, R & D 121072300166-7, and the Russian Science Foundation (grant 19-79-30086-P). N. V. Sidorov thanks the Ministry of Education and Science (topic FMEZ-2025-0055). A. Yu. Pyatyshev thanks the Russian Science Foundation (grant 19-79-30086-P). V. V. Galutskiy and E. V. Stroganova thank the Ministry of Education and Science (topic FZEN-2023-0006).

Funding:

The topics MEZ-2025-0055, R&D 121072300166-7, Russian Science Foundation (grant 19-79-30086-P).

For citation:

Vibrational spectroscopy of gradient LiNbO₃:Er³⁺ crystal / N. V. Sidorov [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 2. P. 51–55. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.008.

Нелинейно-оптический монокристалл ниобата лития (LiNbO₃) обладает рядом уникальных свойств, что обеспечивает его широкое применение [1; 2]. При этом для изготовления функциональных элементов в промышленности в основном используются композиционно однородные монокристаллы LiNbO₃ конгруэнтного состава ($R = [Li] / [Nb] = 0,946$), как номинально чистые, так и легированные.

В последние годы в материаловедении интенсивно развивается направление, связанное с созданием структур с изменяющимися по объему физическими характеристиками [3; 4]. Направленные изменения физических характеристик в материале задаются пространственным изменением состава материала. Такие материалы получили название «градиентные».

Легирование редкоземельными элементами позволяет значительно расширить возможности практического применения градиентных материалов на основе LiNbO₃ [5; 6]. В частности, ион Er³⁺ является весьма эффективным излучателем в видимой и ИК-областях спектра [7; 8]. Кристаллы LiNbO₃:Er³⁺ удачно сочетают превосходные нелинейно-оптические свойства матрицы номинально чистого LiNbO₃ и лазерные характеристики иона Er³⁺. Градиент состава в кристалле LiNbO₃:Er³⁺ позволяет компенсировать температурные искажения при нелинейно-оптическом преобразовании и создать оптимальные условия для генерации и преобразования лазерного излучения [5].

При выращивании градиентных кристаллов LiNbO₃ градиент состава реализуется в сильно неравновесных условиях в соответствии с инконгруэнтным плавлением кристалла [9; 10]. Казалось бы, что полученные в таких условиях градиентные кристаллы LiNbO₃ должны характеризоваться повышенным содержанием различного вида точечных и пространственных дефектов. Однако есть основания полагать, что это не всегда так. Особенности определенных химически активных комплексов в расплаве [10], определяющие особенности локализации в кислородно-октаэдрических кластерах MeO₆ (Me — Li⁺, Nb⁵⁺, вакантный октаэдр V, примесный ион) кристалла LiNbO₃ основных (Li⁺, Nb⁵⁺) и легирующих ионов [7; 9] (а также атомов водорода, связанных с атомами кислорода водородной связью [11–13]), при определенных условиях могут привести к более совершенной кристаллической структуре как легированных композиционно-неоднородных кристаллов, так и градиентных кристаллов LiNbO₃.

Основными дефектами структуры, оказывающими значительное влияние на физические характеристики кристалла LiNbO₃, являются точечные дефекты в виде основных катионов (Li⁺, Nb⁵⁺), расположенных в кислородных октаэдрах O₆ не в своих позициях, и катионов примесных металлов, а также микровключения примесных фаз других ниобатов лития, кластерные дефекты и комплексные дефекты, обусловленные наличием в структуре OH⁻-групп [8; 11; 12]. Методы колебательной спектроскопии (комбинационное рассеяние (КР) и ИК-поглощение) являются эффективными методами исследования влияния этих дефектов на структуру кристаллов.

В данной работе приведены результаты исследований полных спектров КР и ИК-поглощения градиентного кристалла LiNbO₃:Er³⁺ (конгруэнтного состава по основным компонентам, градиент Er³⁺ 0,55 ат %/см).

Для выращивания градиентного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ использовался метод Чохральского с жидкостной подпиткой (метод двойного тигля). Для приготовления шихты использовались оксиды ниобия (чистота 99,97 %), эрбия (чистота 99,99 %) и карбонат лития (чистота 99,3 %), взятые в необходимых массовых соотношениях для получения LiNbO_3 [5]. Шихта таблетировалась при давлении 60–120 атмосфер в плексигласовых пресс-формах. Полученные таблетки помещались в муфельную печь для проведения твердофазного синтеза в течение суток при температуре 900 °С. Для выращивания кристаллов LiNbO_3 с концентрационным профилем Er^{3+} производилось наплавление шихты в виде таблеток в систему тиглей. Выращенный монокристалл подвергался отжигу в муфельной печи при температуре 1200 °С в течение 5 ч. Более подробно технология выращивания градиентных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ представлена в работе [5]. Концентрация ионов Er^{3+} в участке 1 составляла 3,0 ат % и линейно уменьшалась с градиентом 0,55 ат %/см. Образец сравнения — композиционно однородный монокристалл $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ (3,1 вес %) выращивался методом Чохральского в воздушной атмосфере [7]. При выращивании кристалла фронт кристаллизации был плоским. Использовалась высокочистая, однородная по химическому составу, монофазная гранулированная шихта ниобата лития конгруэнтного состава с высокой насыпной плотностью, разработанная в ИХТРЭМС КНЦ РАН (ТУ 0.027.039). Легирующий элемент Er^{3+} вводился в шихту непосредственно перед наплавлением в виде оксида Er_2O_3 (чистота 99,99 %).

Для регистрации спектров КР использовался спектрометр BWS465-785H (B & W Tek, Plainsboro Township, NJ, USA). Для возбуждения спектров КР использовался непрерывный лазер с длиной волны 785 нм и мощностью 10 мВт. Спектральное разрешение составляло 3,5 см^{-1} . Регистрация спектров ИК-поглощения в области валентных колебаний ОН-групп производилась с использованием спектрометра Bruker VERTEX 70x (Bruker, Germany) со спектральным разрешением 0,4 см^{-1} . Измерения проводились в вакууме при давлении 1,78 ГПа и комнатной температуре.

Зарегистрированные спектры КР градиентного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ существенно отличаются от спектров КР композиционно однородных монокристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ (3,1 вес %) и $\text{LiNbO}_{3\text{конг}}$. Спектры КР градиентного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ расположены на широкой полосе люминесценции, адекватно вычесть которую не получается. Обращает на себя внимание также и то, что в спектрах КР градиентного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ интенсивность линий в спектре КР, соответствующих фундаментальным колебаниям решетки, существенно меньше, чем в спектре композиционно однородных монокристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ (3,1 вес %) и $\text{LiNbO}_{3\text{конг}}$. Можно заметить отсутствие в спектре КР градиентного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ нескольких линий КР, соответствующих фундаментальным колебаниям решетки: линия Е-типа симметрии с частотой 429 см^{-1} и линия валентных мостиковых колебаний атомов кислорода кислородных октаэдров O_6 с частотой 876 см^{-1} . Были зарегистрированы довольно интенсивные линии КР в диапазоне 100–2 850 см^{-1} , соответствующие спектру второго порядка, которых нет в спектре КР кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ (3,1 вес %). Необходимо отметить, что при возбуждении лазерной линией 785 нм спектры КР не зависят от ориентации вектора возбуждающего лазерного излучения относительно полярной оси кристалла, что является необычным. На данном этапе мы затрудняемся объяснить этот факт. Сравнительно узкие линии с частотами 2 427, 2 475, 2 533, 2 592, 2 660 и 2 828 см^{-1} соответствуют люминесцентным переходам $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ в ионе Er^{3+} .

В спектре ИК-поглощения кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ (3,1 вес %) уверенно проявляются несколько линий. Линия с частотой 3 494 см^{-1} соответствует валентным колебаниям ОН-группы в кластерном дефектном узле Er^{3+} ($\text{Er}_{\text{Li}}^{2+}$ -ОН- $\text{Er}_{\text{Nb}}^{2+}$), который состоит из одного точечного дефекта Er_{Li} (ион Er^{3+} в позиции иона Li^+) и одного точечного дефекта Er_{Nb} (ион Er^{3+} в позиции иона Nb^{5+} идеальной структуры LiNbO_3 стехиометрического состава) [9]. Линии поглощения с частотами 2 851 и 2 918 см^{-1} соответствуют симметричному и антисимметричному валентному колебанию атомов водорода связи С-Н группы CH_2 . Соединения с группами CH_2 могут присутствовать в микроколичествах на поверхности кристалла вследствие протирки поверхности кристалла этиловым спиртом после полировки. Линии поглощения с частотами 2 115 и 2 338 см^{-1} соответствуют полосам поглощения СО и CO_2 групп. Их происхождение может быть связано с наличием карбоната лития, из которого готовится шихта для выращивания кристалла ниобата лития.

Было обнаружено существенное различие в спектрах ИК-поглощения композиционно однородного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ (3,1 вес %) и градиентного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$. Градиентный кристалл обладает намного большим поглощением в диапазоне частот $2\,000\text{--}4\,000\text{ см}^{-1}$. В то же время характерной особенностью исследованных нами композиционно однородного $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ (3,1 вес %) и градиентного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ является отсутствие расщепления линии валентных колебаний ОН-групп, как это наблюдается для многих композиционно однородных нестехиометрических номинально чистых и легированных кристаллов LiNbO_3 [12]. В исследованных нами композиционно однородном кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ (3,1 вес %) и градиентном кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ величина $R \approx 1$, то есть близка к таковой для кристалла стехиометрического состава. С помощью метода Клавира [13] была рассчитана объемная концентрация ОН-групп. В градиентном кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ она не превышает $7,0 \times 10^{16}\text{ см}^{-3}$ и уменьшается вслед за градиентом ионов эрбия. Данная величина в несколько раз меньше, чем в композиционно однородном кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ (3,1 вес %), а также в конгруэнтном $\text{LiNbO}_{3\text{конг}}$ и стехиометрическом $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$ кристаллах. Это говорит о более низкой проводимости градиентного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ относительно композиционно однородных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ (3,1 вес %), $\text{LiNbO}_{3\text{конг}}$ и $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$.

Таким образом, нами впервые исследован спектр комбинационного рассеяния в широком диапазоне частот при возбуждении излучением ближнего ИК-диапазона (785 нм) градиентного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$. Наблюдается совпадение спектра при различной ориентации возбуждающего лазерного излучения относительно сегнетоэлектрической оси кристалла. В то же время в спектре комбинационного рассеяния градиентного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ в диапазоне частот $1\,000\text{--}2\,400\text{ см}^{-1}$ зарегистрирован ряд линий, соответствующих спектру второго порядка, отсутствующих в спектре композиционно однородного монокристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ (3,1 вес %). При этом интенсивность линий комбинационного рассеяния второго порядка превышает интенсивность линий, соответствующих фундаментальным колебаниям решетки. Кислородно-октаэдрические кластеры MeO_6 в структуре кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ (3,1 вес %) и градиентного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$, так же как и кислородно-октаэдрические кластеры MeO_6 высокосовершенного композиционно однородного кристалла стехиометрического состава, практически не искажены. Показано также, что в структуре исследованных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ практически отсутствуют точечные дефекты Nb_{Li} . Объемная концентрация ОН-групп в градиентном кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ почти на порядок меньше, чем в композиционно однородном кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ (3,1 вес %).

Список источников

1. Boes A., Chang L., Langrock C., Yu M., Zhang M., Lin Q., Lončar M., Fejer M., Bowers J., Mitchell A. Lithium niobate photonics: Unlocking the electromagnetic spectrum // *Science*. 2023. Vol. 379. Issue 6627. P. eabj4396.
2. Wang L., Du H., Zhang X., Chen F. Optical nonlinearity of thin film lithium niobate: devices and recent progress // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2025. Vol. 58, Issue 2. P. 023001.
3. Ma S., Xiong Z., Liu Z., Wang L., Dou R., Zhang Q., Wei M., Cheng T., Jiang H. Thermal effects and their suppression of end-pumped gradient-doped Nd:YAG crystals // *Infrared Physics & Technology*. 2025. Vol. 148. P. 105845.
4. Wang X., Li X., Deng M., Zhang Z., Yang F., Kou H., Su L., Wu A., Chen J. A couple-free structured LuAG:Ce-LuAG scintillating single crystal fiber grown by a laser-heated pedestal growth method // *Crystal Growth & Design*. 2024. Vol. 24, Issue 8. P. 3333–3341.
5. Galutskiy V. V., Vatlina M. I., Stroganova E. V. Growth of single crystal with a gradient of concentration of impurities by the Czochralski method using additional liquid charging // *Journal of Crystal Growth*. 2009. Vol. 311, Issue 4. P. 1190–1194.
6. Tao Z., Cheng F., Wang Y., Su S., Song E., Gan J., Ye S. A robust strategy for preparing Li-gradient $\text{LiNbO}_3:\text{Yb/Er}$ nanocrystals with improved dynamic force-optical response // *Chemical Engineering Journal*. 2025. Vol. 503. P. 158351.
7. Палатников М. Н., Бирюкова И. В., Щербина О. Б., Сидоров Н. В., Макарова О. В., Теплякова Н. А. Выращивание и концентрационные зависимости свойств кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ // *Кристаллография*. 2016. Т. 61, вып. 6. С. 999–1008.
8. Zhang Z., Wu Z., Zhang Y., Liu S., Liu H., Zheng D., Kong Y., Xu J. The doping concentration optimization of Er-doped LiNbO_3 crystals for LNOI lasers and amplifiers // *Crystal Growth & Design*. 2024. Vol. 24, Issue 16. P. 6838–6844.
9. Палатников М. Н., Сидоров Н. В., Палатникова О. В., Бирюкова И. В. Дефектная структура кристаллов ниобата лития одинарного и двойного легирования. М.: РАН, 2024. 331 с.

10. Uda S., Tiller W. A. The dissociation and ionization of LiNbO_3 melts // *Journal of Crystal Growth*. 1992. Vol. 121, Issues 1–2. P. 155–190.
11. Lengyel K., Péter Á., Kovács L., Corradi G., Pálfi L., Hebling J., Unferdorben M., Dravecz G., Hajdara I., Szaller Zs., Polgár K. Growth, defect structure, and THz application of stoichiometric lithium niobate // *Applied Physics Reviews*. 2015. Vol. 2, Issue 4. P. 040601.
12. Cabrera J. M., Olivares J., Carrascosa M., Rams J., Müller R., Diéguez E. Hydrogen in lithium niobate // *Advances in Physics*. 1996. Vol. 45, Issue 5. P. 349–392.
13. Klauer S., Wöhlecke M., Kapphan S. Influence of H-D isotopic substitution on the protonic conductivity of LiNbO_3 // *Physical Review B*. 1992. Vol. 45, Issue 6. P. 2786–2799.

References

1. Boes A., Chang L., Langrock C., Yu M., Zhang M., Lin Q., Lončar M., Fejer M., Bowers J., Mitchell A. Lithium niobate photonics: Unlocking the electromagnetic spectrum. *Science*, 2023, vol. 379, issue 6627, p. eabj4396.
2. Wang L., Du H., Zhang X., Chen F. Optical nonlinearity of thin film lithium niobate: devices and recent progress. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2025, vol. 58, issue 2, p. 023001.
3. Ma S., Xiong Z., Liu Z., Wang L., Dou R., Zhang Q., Wei M., Cheng T., Jiang H. Thermal effects and their suppression of end-pumped gradient-doped Nd:YAG crystals. *Infrared Physics & Technology*, 2025, vol. 148, p. 105845.
4. Wang X., Li X., Deng M., Zhang Z., Yang F., Kou H., Su L., Wu A., Chen J. A couple-free structured LuAG:Ce-LuAG scintillating single crystal fiber grown by a laser-heated pedestal growth method. *Crystal Growth & Design*, 2024, vol. 24, issue 8, pp. 3333–3341.
5. Galutskiy V. V., Vatlina M. I., Stroganova E. V. Growth of single crystal with a gradient of concentration of impurities by the Czochralski method using additional liquid charging. *Journal of Crystal Growth*, 2009, vol. 311, issue 4, pp. 1190–1194.
6. Tao Z., Cheng F., Wang Y., Su S., Song E., Gan J., Ye S. A robust strategy for preparing Li-gradient LiNbO_3 :Yb/Er nanocrystals with improved dynamic force-optical response. *Chemical Engineering Journal*, 2025, vol. 503, p. 158351.
7. Palatnikov M. N., Biryukova I. V., Shcherbina O. B., Sidorov N. V., Makarova O. V., Teplyakova N. A. Growth of LiNbO_3 :Er crystals and concentration dependences of their properties. *Crystallography Reports*, 2016, vol. 61, issue 6, pp. 1031–1038.
8. Zhang Z., Wu Z., Zhang Y., Liu S., Liu H., Zheng D., Kong Y., Xu J. The doping concentration optimization of Er-doped LiNbO_3 crystals for LNOI lasers and amplifiers. *Crystal Growth & Design*, 2024, vol. 24, issue 16, pp. 6838–6844.
9. Palatnikov M. N., Sidorov N. V., Palatnikova O. V., Biryukova I. V. *Defect structure of single and double doped lithium niobate crystals*. Moscow, RAS, 2024, 331 p. (In Russ.).
10. Uda S., Tiller W. A. The dissociation and ionization of LiNbO_3 melts. *Journal of Crystal Growth*, 1992, vol. 121, issues 1–2, pp. 155–190.
11. Lengyel K., Péter Á., Kovács L., Corradi G., Pálfi L., Hebling J., Unferdorben M., Dravecz G., Hajdara I., Szaller Zs., Polgár K. Growth, defect structure, and THz application of stoichiometric lithium niobate. *Applied Physics Reviews*, 2015, vol. 2, issue 4, p. 040601.
12. Cabrera J. M., Olivares J., Carrascosa M., Rams J., Müller R., Diéguez E. Hydrogen in lithium niobate. *Advances in Physics*, 1996, vol. 45, issue 5, pp. 349–392.
13. Klauer S., Wöhlecke M., Kapphan S. Influence of H-D isotopic substitution on the protonic conductivity of LiNbO_3 . *Physical Review B*, 1992, vol. 45, issue 6, pp. 2786–2799.

Сведения об авторах

Н. В. Сидоров — доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник;

А. Ю. Пятышев — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник;

А. В. Скрабатун — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник;

Е. В. Строганова — доктор физико-математических наук;

В. В. Галуцкий — доктор физико-математических наук.

Information about the authors

N. V. Sidorov — DSc (Physics & Mathematics), Professor;

A. Yu. Pyatyshev — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher;

A. V. Skrabatun — PhD (Physics & Mathematics), Researcher;

E. V. Stroganova — DSc (Physics & Mathematics);

V. V. Galuckiy — DSc (Physics & Mathematics).

Статья поступила в редакцию 14.07.2025; одобрена после рецензирования 04.08.2025; принята к публикации 18.08.2025.
The article was submitted 14.07.2025; approved after reviewing 04.08.2025; accepted for publication 18.08.2025.