

Научная статья
УДК 535.375.54
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.4.014

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОГО СОВЕРШЕНСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ И КЕРАМИК НИОБАТА И ТАНТАЛАТА ЛИТИЯ РАЗНОГО СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИЙ ПО СПЕКТРАМ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА ПЕРВОГО И ВТОРОГО ПОРЯДКОВ

Николай Васильевич Сидоров¹, Александр Юрьевич Пятышев², Павел Петрович Свербиль³, Александр Владимирович Скрабатун⁴, Михаил Николаевич Палатников⁵

^{1, 5}Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

^{2, 3, 4}Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

⁴Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

¹n.sidorov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9016-1358>

²jb_valensia@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6663-9737>

³sverbilpp@lebedev.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1266-5929>

⁴skrabatunav@lebedev.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2279-7079>

⁵m.palatnikov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9686-0563>

Аннотация

Приведены результаты исследования структурного совершенства кристаллов и керамик ниобата и танталата лития различного состава. В твёрдых растворах семейства $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ с $0,4 \leq x \leq 0,6$ обнаружены линии в спектрах КР как первого (в диапазоне $150\text{--}900\text{ см}^{-1}$), так и второго (в диапазоне $900\text{--}2000\text{ см}^{-1}$) порядков. Линии КР второго порядка в диапазоне $900\text{--}2000\text{ см}^{-1}$ были зарегистрированы нами также в монокристаллах ниобата и танталата лития одинарного легирования $\text{LiNbO}_3\text{:Tb}$ (2,24 мас. %), $\text{LiTaO}_3\text{:Cr}$ (0,005 мас. %), танталата лития двойного легирования $\text{LiTaO}_3\text{:Cr}$ (0,2):Nd (0,45 мас. %). Наблюдаемые линии в диапазоне $900\text{--}2000\text{ см}^{-1}$ объяснены как проявление обертоновых процессов, соответствующих бифонам.

Ключевые слова:

ниобат лития, танталат лития, монокристалл, керамика, легирование, комбинационное рассеяние

Благодарности:

статья выполнена при поддержке темы НИОКТР 121072300166-7, а также Российского фонда фундаментальных исследований и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант 20-52-04001 Бел_мол_а).

Для цитирования:

Исследование структурного совершенства монокристаллов и керамик ниобата и танталата лития разного состава и технологий по спектрам комбинационного рассеяния света первого и второго порядков / Н. В. Сидоров [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 4. С. 83–87. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.4.014

Original article

INVESTIGATION OF THE STRUCTURAL PERFECTION OF LITHIUM NIOBATE AND TANTALATE SINGLE CRYSTALS AND CERAMICS OF DIFFERENT COMPOSITION AND TECHNOLOGIES ON THE FIRST AND SECOND ORDERS RAMAN SCATTERING SPECTRA

Nikolay V. Sidorov¹, Alexander Yu. Pyatyshev², Pavel P. Sverbil³, Alexander V. Skrabatun⁴, Mikhail N. Palatnikov⁵

^{1, 5}I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

^{2, 3, 4}P. N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁴Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

¹n.sidorov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9016-1358>

²jb_valensia@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6663-9737>

³sverbilpp@lebedev.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1266-5929>

⁴skrabatunav@lebedev.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2279-7079>

⁵m.palatnikov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9686-0563>

Abstract

The results of a study of the structural perfection of crystals and ceramics of lithium niobate and lithium tantalate of various compositions are presented. In solid solutions of the $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ family with $0.4 \leq x \leq 0.6$, lines were found in the Raman spectra, both of the first (in the range of $150\text{--}900\text{ cm}^{-1}$) and of the second order, located in the range of $900\text{--}2000\text{ cm}^{-1}$. Second-order Raman lines in the range $900\text{--}2000\text{ cm}^{-1}$ were also recorded by us in single

crystals of single-doped lithium niobate and lithium tantalate $\text{LiNbO}_3\text{:Tb}$ (2.24 wt. %), $\text{LiTaO}_3\text{:Cr}$ (0.005 wt. %), and double-doped lithium tantalate $\text{LiTaO}_3\text{:Cr}$ (0.2):Nd (0.45 wt. %). The observed lines in the range 900–2000 cm^{-1} are explained as a manifestation of overtone processes corresponding to biphonons.

Keywords:

lithium niobate, lithium tantalate, single crystal, ceramics, doping, Raman scattering

Acknowledgments:

the study was supported by research topics 121072300166-7 and RFBR and BRFFR (grant 20-52-04001 Bel_mol_a).

For citation:

Investigation of the structural perfection of lithium niobate and tantalate single crystals and ceramics of different composition and technologies on the first and second orders Raman scattering spectra / N. V. Sidorov [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 4. P. 83–87. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.4.014

Актуальной задачей современного физического материаловедения является разработка структурно высокосовершенных и композиционно однородных функциональных материалов электронной техники на основе нелинейно-оптических монокристаллов и керамик с общей формулой $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$, важнейшими из которых являются монокристаллы ниобата лития (LiNbO_3) и танталата лития (LiTaO_3). LiNbO_3 и LiTaO_3 — кислородно-октаэдрические фазы переменного состава с широкой областью гомогенности на фазовой диаграмме. Номинально чистые монокристаллы LiNbO_3 и LiTaO_3 характеризуются зависящим от стехиометрии (величины $R = [\text{Li}]/[\text{Nb}]$) существенным беспорядком в расположении структурных единиц катионной подрешётки вдоль полярной оси, а керамические образцы, кроме того, — высокой микронеоднородностью: наличием границ зёрен, отличающихся по структуре и степени дефектности от объёма зёрен, микроколичеств примесных фаз. И монокристаллы, и керамика LiNbO_3 и LiTaO_3 характеризуются высокой внутренней микроструктурированностью, в том числе включающей микроструктуры различного типа из кислородно-октаэдрических кластеров MeO_6 (Me — Li, Nb, примесный металл, вакансия). В легированных кристаллах и керамиках величина R определяется также типом и концентрацией легирующей примеси. Указанные особенности разупорядочения структуры кристаллов и керамик должны приводить к эффектам сильного ангармонического взаимодействия в колебательном движении ионов кристаллической решетки, приводящим при определенных условиях к появлению колебательного спектра второго порядка, свидетельствующего о структурном несовершенстве материала.

Мощным инструментом исследования структурного несовершенства кристаллов LiNbO_3 и LiTaO_3 как фоторефрактивных фаз переменного состава являются спектры комбинационного рассеяния света (КР) первого и второго порядков. Причем спектры второго порядка наиболее чувствительны к малейшим изменениям особенностей взаимодействий между структурными единицами кристалла. Чем более совершенна структура кристалла, тем слабее ангармонизм колебаний кристаллической решетки, тем менее интенсивным должен быть спектр КР второго порядка. В частности, в спектре КР высокосовершенных кристаллов LiNbO_3 стехиометрического состава ($[\text{Li}]/[\text{Nb}] = 1$), катионная подрешётка которого наиболее упорядочена в ряду кристаллов других составов, полностью отсутствуют линии, принадлежащие спектру второго порядка [1, 2]. Колебательные спектры второго порядка монокристаллических и керамических кислородно-октаэдрических фаз переменного состава с общей формулой $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ в настоящее время практически не исследованы ввиду больших экспериментальных трудностей как получения самих спектров, так и их интерпретации. Экспериментальное обнаружение, интерпретация линий, соответствующих спектру второго порядка, установление причин появления этих линий в спектре, установление связи параметров спектральных линий с особенностями структурного несовершенства кристаллов — все это самостоятельная фундаментальная задача большой практической значимости, решение которой позволит создавать высокосовершенные материалы с оптимальными физическими характеристиками.

В данной работе приведены результаты исследований полных спектров КР некоторых составов монокристаллов и керамик с общей формулой $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3\text{:Me}$ (Me — легирующий металл). Были зарегистрированы в диапазоне 50–2500 cm^{-1} и исследованы спектры КР первого и второго порядков: номинально чистых керамик $\text{Li}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_3$ с составами в пределах области гомогенности; номинально чистых керамических твёрдых растворов $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$; монокристаллов одинарного легирования $\text{LiNbO}_3\text{:Tb}$ и $\text{LiTaO}_3\text{:Cr}$; монокристаллов двойного легирования $\text{LiNbO}_3\text{:Gd:Mg}$, $\text{LiNbO}_3\text{:Fe:Ce}$ и $\text{LiNbO}_3\text{:Cu:Gd}$. Все исследованные образцы являются сегнетоэлектриками. На основе общей теории

связанных состояний квазичастиц, возникающих вследствие ангармонического взаимодействия фононов, показана возможность существования в структуре исследованных соединений связанных состояний квадрупольных возбуждений антиполярного типа и определены условия их проявления в колебательном спектре.

Необходимо отметить, что для создания высокосовершенных материалов для преобразования и модуляции излучения в настоящее время активно исследуются монокристаллы LiNbO_3 и LiTaO_3 с двойным легированием. Двойное легирование позволяет более тонко, чем одинарное, регулировать упорядочение структурных единиц катионной подрешётки и поляризуемость кластеров NbO_6 , определяющих сегнетоэлектрические и нелинейно-оптические характеристики материала, а также более тонко регулировать тип и количество точечных и комплексных дефектов с локализованными электронами, определяющих величину эффекта фоторефракции. Применяя двойное легирование, когда одна из добавок является «фоторефрактивной», возможно создавать оптические материалы с минимальным временем фоторефрактивного отклика и повышенной стойкостью к оптическому повреждению. Все исследованные в данной работе образцы являются фоторефрактивными фазами переменного состава. Они обладают различной спектральной чувствительностью к повреждению лазерным излучением (optical damage), кроме того, для них характерны отличия в особенностях взаимодействия материала с электромагнитным излучением. Поэтому нами были выполнены сравнительные исследования спектров КР первого и второго порядков перечисленных выше соединений в видимой и ближней ИК-областях спектра при возбуждении спектра лазерными линиями в видимой ($\lambda_0 = 532$ нм) и ближней ($\lambda_0 = 785$ нм) ИК-областях.

Для регистрации спектров КР видимой и ближней ИК-областей использовались спектрометры BWS465-532S и BWS465-785H, позволяющие регистрировать спектры соответственно в диапазонах $50\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ и $50\text{--}2850\text{ см}^{-1}$ с разрешением $4,5$ и $3,5\text{ см}^{-1}$ соответственно. Для возбуждения спектров КР в видимой и ближней ИК-областях использовались лазеры с длиной волны 532 и 785 нм. Мощность на этих линиях генерации в обоих случаях составляла до 100 мВт. Все спектры зарегистрированы при комнатной температуре с использованием геометрии обратного рассеяния. Возбуждающее лазерное излучение вводилось в первый канал двухканального световода и фокусировалось после выхода из него на поверхность исследуемого образца вдоль или перпендикулярно полярной оси Z . Фокальная перетяжка находилась в центре исследуемого кристалла. Рассеянный свет собирался в обратном направлении и вводился во второй канал световода. После селективного светофильтра, отсекающего возбуждающее излучение, сигнал КР попадал на щель спектрометра.

Исследования спектров КР керамических твёрдых растворов с общей формулой $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ обнаружили, что керамика LiNbO_3 и LiTaO_3 и твёрдый раствор $\text{LiNb}_{0,99}\text{Ta}_{0,01}\text{O}_3$ имеют спектр КР только первого порядка. Однако в спектре соединения $\text{LiNb}_{0,99}\text{Ta}_{0,01}\text{O}_3$ в диапазоне $900\text{--}2000\text{ см}^{-1}$ все же присутствует слабый непрерывный фон для всех зарегистрированных мод. В то же время в других твёрдых растворах семейства $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ с $0,4 \leq x \leq 0,6$, отличающихся более разупорядоченной структурой [3], зарегистрированы спектры КР как первого (расположенного в диапазоне $150\text{--}900\text{ см}^{-1}$), так и второго (в диапазоне $900\text{--}2000\text{ см}^{-1}$) порядков. При этом спектры КР второго порядка в диапазоне $900\text{--}2000\text{ см}^{-1}$ расположены на фоне люминесцентного гало с максимумом $\approx 1250\text{ см}^{-1}$ и наблюдаются только при возбуждении лазерной линией в ближней ИК-области (785 нм). При возбуждении лазерной линией 532 нм в диапазоне $900\text{--}2000\text{ см}^{-1}$ наблюдаются только спектры первого порядка. В спектре КР второго порядка некоторых образцов впервые были обнаружены две линии, частоты которых превышают точное значение обертона фундаментальной моды $4A_1(z)$. Это убедительно свидетельствует о проявлении в спектре КР второго порядка связанных и резонансных состояний квазичастиц — бифононов. Существенно отметить и то, что в исследованных керамиках с $0,4 \leq x \leq 0,6$ существуют микрообласти, интенсивность спектра КР второго порядка которых существенно понижена или равна нулю. В то же время в спектре КР номинально чистых и слабо легированных керамик LiNbO_3 , LiTaO_3 и $\text{LiNb}_{0,99}\text{Ta}_{0,01}\text{O}_3$ такие микрообласти отсутствуют, что свидетельствует о более высокой композиционной однородности керамик. Полученные результаты также убедительно подтверждают данные работы [3] о том, что трансформация с возрастанием x структуры LiTaO_3 в структуру LiNbO_3 в системе керамических твёрдых растворов $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ происходит через некоторую промежуточную разупорядоченную структуру, отличную

от структур кристаллов ниобата и танталата лития. Именно для этой промежуточной разупорядоченной структуры характерен колебательный спектр второго порядка в диапазоне $900\text{--}2000\text{ см}^{-1}$ и наблюдается нелинейная зависимость от состава основных параметров спектральных линий — частоты, ширины, интенсивности и параметра формы [3, 4]. При этом крайние соединения в системе твёрдых растворов $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ (кристаллы LiNbO_3 и LiTaO_3) изоморфны и характеризуются пространственной группой симметрии C_{3v}^6 ($R3c$) с двумя формульными единицами в элементарной ячейке. То есть при переходе (при изменении x) от структуры LiTaO_3 к структуре LiNbO_3 структурного фазового перехода не наблюдается.

Исследования по спектрам КР серии керамических твёрдых растворов $\text{Li}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_3$ с составами в пределах области гомогенности (48,5, 48,7, 49,0, 49,1, 49,3, 49,5, 50,5, 50,8, 51,0, 51,2 и 51,4 мол. % Li_2O) показывают, что для них, как и для системы твёрдых растворов $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$, в диапазоне $900\text{--}2000\text{ см}^{-1}$ характерно проявление спектра второго порядка. Однако нелинейность в поведении основных параметров спектральных линий первого порядка, наблюдаемая с изменением x для системы твёрдых растворов $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ [3], в твёрдых растворах $\text{Li}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_3$ не наблюдается. Причем в спектре КР керамик $\text{Li}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_3$ указанных выше составов, как и в спектре керамик $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ с $0,4 \leq x \leq 0,6$, присутствуют две линии с частотами, превышающими точное значение обертона ($864 \times 2 = 1728\text{ см}^{-1}$) моды $4A_1(z)$, соответствующие бифонам.

Пики в спектрах КР второго порядка в диапазоне $900\text{--}2000\text{ см}^{-1}$, соответствующие обертоном процессам, полученные при возбуждении линией 785 нм , были обнаружены нами также в монокристаллах ниобата и танталата лития одинарного легирования $\text{LiNbO}_3\text{:Tb}$ (2,24 мас. %), $\text{LiTaO}_3\text{:Cr}$ (0,005 мас. %), танталата лития двойного легирования $\text{LiTaO}_3\text{:Cr}$ (0,2):Nd (0,45 мас. %) [4–6]. Причем, как и для керамических твёрдых растворов $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ и $\text{Li}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_3$, при возбуждении лазерной линией 532 нм спектры второго порядка указанных выше монокристаллов в диапазоне $900\text{--}2000\text{ см}^{-1}$ не наблюдаются. Зарегистрированные при возбуждении лазерным излучением ближней ИК-области (785 нм) линии спектра КР второго порядка данных кристаллов расположены на фоне широкого люминесцентного гало с максимумом при $\approx 1250\text{ см}^{-1}$. Данные линии КР поляризованы и проявляются только в геометрии рассеяния $x(zz,zy)\bar{x}$. Наличие полосы фотолюминесценции в исследованных кристаллах в ближней ИК-области может быть обусловлено центрами свечения в виде точечных дефектов Tb_{Li} , Nd_{Li} , Cr_{Ta} , Cr_{Li} и др., а также наличием дефектов в виде поляронов малого радиуса Ta_{Li} и более сложных биполярных связок в виде $\text{Nb}_{\text{Li}}\text{--Nb}_{\text{Nb}}$, $\text{Ta}_{\text{Li}}\text{--Ta}_{\text{Ta}}$.

Появление колебательного спектра второго порядка в исследованных монокристаллах и керамиках можно объяснить на основе общей теории связанных состояний квазичастиц. Согласно работам [5, 7, 8–10], плотность двухфононных состояний $\rho_2(\omega)$ в кристаллах можно вычислить с использованием однофононных функций Грина по формуле:

$$\rho_2(\omega) = -\text{Im} \left[\frac{2f(\omega)}{1 - \lambda_4 f(\omega)} \right],$$

где λ_4 — безразмерный параметр ангармонизма, а $f(\omega) = b \int_0^d \frac{\sqrt{u}}{2u+a} du = \frac{3}{2\sqrt{d^3}} \left(\sqrt{d} - \sqrt{\frac{a}{2}} \arctg \sqrt{\frac{2d}{a}} \right)$

Пользуясь этими формулами и методикой, изложенной в работах [5, 7], нами были рассчитаны обертонные состояния полносимметричной моды $4A_1(z)$ в исследованных кристаллах и керамических твёрдых растворах.

Список источников

1. Anikiev A. A., Sidorov N. V., Palatnikov M. N., Umarov M. F., Anikieva E. N. Parametrization of nonstoichiometric niobate crystals with different states of defectivity // Optical materials. 2021. V. 111. P. 110729.
2. Сидоров Н. В., Волк Т. Р., Маврин Б. Н., Калинин В. Т. Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны. М.: Наука, 2003. 256 с.
3. Сидоров Н. В., Палатников М. Н., Теплякова Н. А., Бирюкова И. В., Титов Р. А., Макарова О. В., Маслобоева С. М. Монокристаллы ниобата и танталата лития разного состава и генезиса. М.: РАН, 2022. С. 288.
4. Sidorov N., Palatnikov M., Pyatyshev A., Sverbil P. Second-order Raman scattering in ferroelectric ceramic solid solutions $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ // Crystals. 2022. V. 12. P. 456–467.

5. Sidorov N. V., Palatnikov M. N., Gorelik V. S., Sverbil P. P. Second-order Raman spectra of a $\text{LiNbO}_3\text{:Tb}$ crystal // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2022. V. 266. P. 120445–120450.
6. Sidorov N., Palatnikov M., Pyatyshev A. Raman Scattering in Double-Doped Single Crystal $\text{LiTaO}_3\text{:Cr (0.2):Nd (0.45 wt. \%)}$ // *Photonics*. 2022. V. 9. P. 712–722.
7. Gorelik V. S., Pyatyshev A. Yu. Raman scattering in diamond nano- and microcrystals, synthesized at high temperatures and high pressures // *Diamond and Related Materials*. 2020. V. 110. P. 108104.
8. Ruvalds J., Zawadowski A. Two-phonon resonances and hybridization of the resonance with single-phonon states // *Physical Review B*. 1970. V. 2, Issue 4. P. 1172–1175.
9. Ruvalds J., Zawadowski A. Indirect coupling and antiresonance of two optic phonons // *Physical Review Letters*. 1970. V. 24, Issue 20. P. 1111–1114.
10. Ruvalds J., Zawadowski A. Resonances of two phonons from different dispersion branches // *Solid State Communications*. 1971. V. 9, Issue 2. P. 129–132.

References

1. Anikiev A. A., Sidorov N. V., Palatnikov M. N., Umarov M. F., Anikieva E. N. Parametrization of nonstoichiometric niobate crystals with different states of defectivity. *Optical materials*, 2021, vol. 111, p. 110729.
2. Sidorov N. V., Volk T. R., Mavrin B. N., Kalinnikov V. T. *Niobat litiya: defecty, fotorefractciya, kolebatelnyy spektr, polyaritony* [Lithium Niobate: Defects, Photorefraction, Vibrational Spectra Polaritons]. Moscow, Nauka, 2003, 255 p. (In Russ.).
3. Sidorov N. V., Palatnikov M. N., Teplyakova N. A., Biryukova I. V., Titov R. A., Makarova O. V., Masloboeva S. M. *Monokrystally niobata i tantalata litiya raznogo sostava i genezisa* [Single crystals of lithium niobate and tantalate of different composition and genesis]. Moscow, Konstanta, 2022, 288 p. (In Russ.).
4. Sidorov N., Palatnikov M., Pyatyshev A., Sverbil P. Second-order Raman scattering in ferroelectric ceramic solid solutions $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$. *Crystals*, 2022, vol. 12, pp. 456–467.
5. Sidorov N. V., Palatnikov M. N., Gorelik V. S., Sverbil P. P. Second-order Raman spectra of a $\text{LiNbO}_3\text{:Tb}$ crystal. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2022, vol. 266, pp. 120445–120450.
6. Sidorov N., Palatnikov M., Pyatyshev A. Raman Scattering in Double-Doped Single Crystal $\text{LiTaO}_3\text{:Cr (0.2):Nd (0.45 wt. \%)}$. *Photonics*, 2022, vol. 9, pp. 712–722.
7. Gorelik V. S., Pyatyshev A. Yu. Raman scattering in diamond nano- and microcrystals, synthesized at high temperatures and high pressures. *Diamond and Related Materials*, 2020, vol. 110, pp. 108104.
8. Ruvalds J., Zawadowski A. Two-phonon resonances and hybridization of the resonance with single-phonon states. *Physical Review B*, 1970, vol. 2, issue 4, pp. 1172–1175.
9. Ruvalds J., Zawadowski A. Indirect coupling and antiresonance of two optic phonons. *Physical Review Letters*, 1970, vol. 24, issue 20, pp. 1111–1114.
10. Ruvalds J., Zawadowski A. Resonances of two phonons from different dispersion branches. *Solid State Communications*, 1971, vol. 9, issue 2, pp. 129–132.

Информация об авторах

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

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

П. П. Свербиль — научный сотрудник;

А. В. Скрабатун — младший научный сотрудник;

М. Н. Палатников — доктор технических наук, главный научный сотрудник.

Information about the authors

N. V. Sidorov — Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Chief researcher;

A. Yu. Pyatyshev — PhD (Physics), researcher;

P. P. Sverbil — researcher;

A. V. Skrabatun — junior researcher;

M. N. Palatnikov — Dr. Sc. (Technology), Chief researcher.

Статья поступила в редакцию 13.01.2023; одобрена после рецензирования 31.01.2023; принята к публикации 01.02.2023.
The article was submitted 13.01.2023; approved after reviewing 31.01.2023; accepted for publication 01.02.2023.