

Научная статья
УДК 535.37, 546.882, 548.4
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.4.015

ОСОБЕННОСТИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ДЕФЕКТНЫХ ЦЕНТРОВ В НИОБИЙСОДЕРЖАЩИХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО РАЗНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

**Максим Владимирович Смирнов¹, Николай Васильевич Сидоров²,
Михаил Николаевич Палатников³, Виталий Борисович Пикулев⁴**

^{1, 2, 3}Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени
И. В. Тананаева Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

⁴Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия

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

²n.sidorov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9016-1358>

³m.palatnikov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3578-6352>

⁴pikulev@petrsu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9016-1358>

Аннотация

Исследуется влияние стехиометрии, типа и концентрации легирующего элемента, технологии спекания монокристаллов LiNbO_3 и керамик ANbO_4 ($A — \text{Gd}, \text{Y}$), полученных по разным технологиям, на фотолюминесцентные свойства. Кристалл $\text{LiNbO}_{3\text{конг}}$ показывает максимальную эмиссию от биполярона $\text{Nb}_{\text{Li}}-\text{Nb}_{\text{Nb}}$, а в кристалле $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$ она минимальна. Изменение фотолюминесценции в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ (0,04÷5,19 мол. % ZnO) и $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$ (0,19÷5,29 мол. % MgO) носит пороговый характер. Керамики YNbO_4 и GdNbO_4 , полученные высокотемпературным отжигом, показывают меньший вклад центров свечения относительно горячепрессованных керамик.

Ключевые слова:

ниобат лития, ортониобат гадолиния, ортониобат иттрия, центры люминесценции, дефекты

Благодарности:

государственное задание по теме научно-исследовательской работы № FMEZ-2022-0016.

Для цитирования:

Особенности люминесцентных дефектных центров в ниобийсодержащих монокристаллических и керамических материалах, полученных по разным технологиям / М. В. Смирнов [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 4. С. 88–94. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.4.015

Original article

THE FEATURES OF LUMINESCENT DEFECT CENTERS IN NIOBIUM CONTAINED MONOCRYSTALLINE AND CERAMIC MATERIALS, OBTAINED BY DIFFERENT TECHNOLOGIES

Maksim V. Smirnov¹, Nikolay V. Sidorov², Mikhail N. Palatnikov³, Vitaliy B. Pikulev⁴

^{1, 2, 3}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

⁴Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia

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

²n.sidorov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9016-1358>

³m.palatnikov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3578-6352>

⁴pikulev@petrsu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9016-1358>

Abstract

The effect of stoichiometry, the type and concentration of dopant element, sintering technology of LiNbO_3 single crystals and ANbO_4 ($A — \text{Gd}, \text{Y}$) ceramics obtained by various technologies on photoluminescent properties was investigated. The $\text{LiNbO}_{3\text{конг}}$ crystal showed maximum emission from $\text{Nb}_{\text{Li}}-\text{Nb}_{\text{Nb}}$ bipolaron, in the $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$ crystal it was minimal. The change of photoluminescence in $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ (0,04÷5,19 mol. % ZnO) and $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$ (0,19÷5,29 mol. % MgO) crystals had a threshold character. YNbO_4 and GdNbO_4 ceramics obtained by high-temperature annealing showed a smaller contribution of luminescence centers relative to hot-pressed ones.

Keywords:

lithium niobate, gadolinium orthoniobate, yttrium orthoniobate, luminescence centers, defects

Acknowledgments:

state task on the topic of research No FMEZ-2022-0016.

For citation:

The features of luminescent defect centers in niobium contained monocrySTALLINE and ceramic materials, obtained by different technologies / M. V. Smirnov [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 4. P. 88–94. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.4.015

Введение

Монокристаллические и керамические материалы с общей формулой ABO_n (A — элементы 1-й или 3-й группы, B — элементы 5-й группы таблицы Менделеева, n — 3 или 4) широко используются в оборонной и гражданской промышленности. Одним из наиболее востребованных монокристаллов является ниобат лития ($LiNbO_3$), который проявляет целый спектр уникальных свойств: сегнетоэлектрические, пьезоэлектрические, нелинейные, электрооптические, фотовольтаические. Благодаря уникальному сочетанию таких свойств кристаллы $LiNbO_3$ находят широкое применение в качестве материала для преобразования частоты лазерного излучения, параметрического усиления и генерации света, телекоммуникации, голографической записи, интегрально-оптических устройств [1]. Нелинейно-оптические, фоторефрактивные и люминесцентные свойства кристалла ниобата лития в основном обусловлены собственными и примесными дефектами кристаллической решетки и тонкими особенностями упорядочения структурных единиц катионной подрешетки вдоль оси роста кристалла. Следовательно, одной из актуальных фундаментальных задач является исследование влияния дефектных комплексов: их тип, количество, локализация, влияние на оптические свойства кристаллов ниобата лития.

Одно из ограничений использования кристалла $LiNbO_3$ в качестве активного элемента для твердотельного квантового генератора оптического излучения и преобразователя излучения на периодических структурах — наличие оптического повреждения (эффекта фоторефракции) [1, 2]. Эффект фоторефракции заключается в изменении показателей преломления при прохождении лазерного излучения через кристалл. Наиболее успешное подавление оптического повреждения заключается в легировании ниобата лития фотовольтаически неактивными элементами (Mg, Zn, In, Er и т. д.), которые под действием лазерного излучения остаются в моновалентном состоянии [2, 3]. Так как фоторефрактивные свойства связаны с дефектами (собственными и примесными) структуры кристалла ниобата лития, то существует множество процессов электронных релаксаций, в частности, спонтанная излучательная рекомбинация, которая является также лимитирующим фактором для создания квантовых оптических генераторов. Совокупность дефектов в сегнетоэлектрике образуют донорные и акцепторные уровни энергии разного залегания в запрещенной зоне кристалла. Исследование люминесценции точечных и комплексных дефектных центров кристалла ниобата лития позволит решить ряд прикладных задач большой практической значимости — получение кристалла ниобата лития с заведомо заданными люминесцентными свойствами.

Керамические твердые растворы типа ABO_4 (A — элементы 1-й или 3-й группы, B — элементы 5-й группы таблицы Менделеева) широко применяются в оптоэлектронике, медицине, физике высоких энергий для регистрации высокоэнергетического ионизирующего излучения (рентгеновского и гамма-лучей). Такие соединения обладают хорошими сцинтилляционными свойствами, природа которых связана с трансфером энергии между центрами свечения BO_4 -групп матрицы и химическими элементами с внутрицентральной люминесценцией (Gd^{3+} , Eu^{3+} , Tb^{3+} и т. д.) [4]. В качестве керамического материала с уникальным сочетанием пьезо-, пьезоэлектрических и фоторефрактивных свойств возможно использовать керамические твердые растворы на основе ниобатов редкоземельных элементов $ANbO_4$ (A — Gd, Y). Структурное состояние такой керамики и, как следствие, её физические свойства можно менять путём изменения размера и формы кристаллитов, технологии синтеза (твердофазный синтез и золь-гель метод), стехиометрии, условий спекания керамики [4, 5]. Поэтому актуальным является исследование природы собственной люминесценции кристаллической матрицы керамик $ANbO_4$ (A — Gd, Y) с помощью фотолюминесцентного анализа с целью установления наиболее подходящих составов для применения их в качестве перспективных материалов электронной техники.

В данной работе представлен обобщённый анализ исследований фотолюминесценции монокристаллических и керамических ниобатов щелочных и редкоземельных элементов в зависимости от влияния состава, типа и концентрации легирующего элемента, метода легирования, технологии синтеза керамики.

Результаты

Исследовались кристаллы, полученные методом Чохральского в воздушной атмосфере на установке промышленного типа «Кристалл 2» из гранулированной шихты ниобата лития, синтезированной

по методике, разработанной в ИХТРЭМС КНЦ РАН [6]. Все кристаллы подвергались послеростовому высокотемпературному отжигу для получения монокристаллического состояния. В качестве объектов исследования выступали: номинально чистые кристаллы ниобата лития конгруэнтного (LiNbO_3 конг) и стехиометрического (LiNbO_3 стех) составов, выращенные из расплава с 48,6 и 58,6 мол. % Li_2O ; кристалл ниобата лития стехиометрического состава (LiNbO_3 стех (6,0 мас. % K_2O)), выращенный методом HTTSSG (high temperature top seeded solution growth) из конгруэнтного расплава с использованием щелочного флюса K_2O ($\approx 6,0$ мас. %); легированные кристаллы $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ (0,04, 0,07, 1,19, 1,42, 2,01, 4,46, 4,50, 4,54, 4,59 и 5,19 мол. % ZnO в кристалле) и $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}$ (0,19, 1,42, 1,66, 2,13, 3,02 мол. % MgO в кристалле), полученные с использованием метода прямого легирования конгруэнтного расплава. Кристаллы $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ (4,74 мол. % ZnO) и $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}$ (5,29 мол. % MgO), полученные по технологии гомогенного легирования с использованием прекурсора $\text{Nb}_2\text{O}_5\text{:Me}$ (Me — Zn, Mg); кристалл $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}$ (5,23 мол. % MgO), полученный по технологии легирования с использованием твердофазной лигатуры. Порошки YNbO_4 и GdNbO_4 , синтезированные золь-гель методом, спекали при высокой температуре (традиционная керамическая технология) и по технологии горячего прессования при одновременном приложении высокой температуры и давления. Наиболее подробно методика выращивания монокристаллов LiNbO_3 , методы легирования, синтез керамик ANbO_4 (A — Gd, Y) описаны в работах [5–7].

Монокристаллические образцы для исследований имели форму прямоугольных параллелепипедов (размеры $\sim 8 \cdot 7 \cdot 6$ мм³), ребра которых совпадали по направлению с кристаллографическими осями X, Y, Z (Z — полярная ось кристалла). Для снятия термоупругих напряжений и накопления поверхностного заряда грани параллелепипедов тщательно полировались. Керамические образцы представляли собой таблетки диаметром 10 мм и высотой 2–3 мм.

Спектры фотolumинесценции регистрировались с помощью спектрографа SOL SL-100M с ПЗС-детектором FLI ML 1107 BlackIlluminated (Hamamatsu). Спектральный диапазон измерений составлял от 380 до 1000 нм. В качестве источника возбуждения использовался непрерывный He-Cd лазер ($\lambda_{\text{возб}} = 325$ нм, 15 мВт). Каждый фотolumинесцентный спектр исправлялся на фоновый сигнал.

На рисунке 1, а–б представлены спектры фотolumинесценции в оптической области кристаллов LiNbO_3 конг, LiNbO_3 стех и LiNbO_3 стех (6,0 мас. % K_2O). В видимой области максимум люминесцентного гало наблюдается при 2,04 эВ, и интенсивность люминесценции меняется следующим образом: $I_1(\text{LiNbO}_3\text{конг}) > I_2(\text{LiNbO}_3\text{стех (6,0 мас. \% K}_2\text{O)}) > I_3(\text{LiNbO}_3\text{стех})$. Поведение интенсивности свечения хорошо коррелирует с изменением стехиометрии кристалла: уменьшение ниобия в базовых позициях лития (дефект Nb_{Li}) приводит к снижению эмиссии в видимой области. На основании работ [8, 9], гало люминесценции на рис. 1, а может быть описана в рамках модели фотоиндуцированного образования биполярных пар $\text{Nb}_{\text{Li}}\text{-Nb}_{\text{Nb}}$, эмиссия которых проявляется при 2,04 эВ. Таким образом, в кристалле LiNbO_3 конг, который имеет наибольшее количество дефектов Nb_{Li} [10], наблюдается максимальное биполярное свечение, а в кристалле LiNbO_3 стех оно минимально. Данные хорошо коррелируют с данными по КРС и рентгеноструктурному анализу [11, 12].

В ближней ИК-области в номинально чистых кристаллах люминесцентное гало наблюдается при 1,45 эВ (рис. 1, б). Вклад в данный максимум вносят максимумы при 1,3 и 1,5 эВ. Обе полосы связаны с дефектом Nb_{Li} [13]. Однако наличие интенсивной люминесценции в кристалле LiNbO_3 стех (6,0 мас. % K_2O) говорит о вкладе другого типа дефектов в фотolumинесценцию ближнего ИК-диапазона. Наличие дефекта V_O в кристалле ниобата лития исключается по многим причинам [14], а искусственно его можно наблюдать только в кристалле, отожженном в вакууме. Это исключает данный дефект в качестве основного центра свечения. Гетеровалентный изоморфизм в нестехиометрических кристаллах LiNbO_3 приводит к образованию литиевых или ниобиевых вакансий (V_{Li} , V_{Nb}) для компенсации избыточного заряда решетки дефекта Nb_{Li} . С точки зрения модели литиевых вакансий дырочные поляроны типа $\text{O}^-\text{V}_{\text{Li}}$ могут выступать в качестве дополнительных центров свечения в данной области.

На рисунке 1, в–е представлена зависимость интенсивности центров люминесценции разной природы (после разложения на составляющие спектров кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Me}$ (Me — Zn, Mg) в видимой (рис. 1, в–г) и ближней (рис. 1, д–е) ИК-областях от концентрации легирующего элемента. Излучательная рекомбинация при 2,04 эВ соответствует биполярону, при 2,85 эВ — внутриконфигурационным переходам в NbO_6 группе, при 1,3 и 1,5 эВ — центрам свечения с участием $\text{O}^-\text{V}_{\text{Li}}$ и Nb_{Li} .

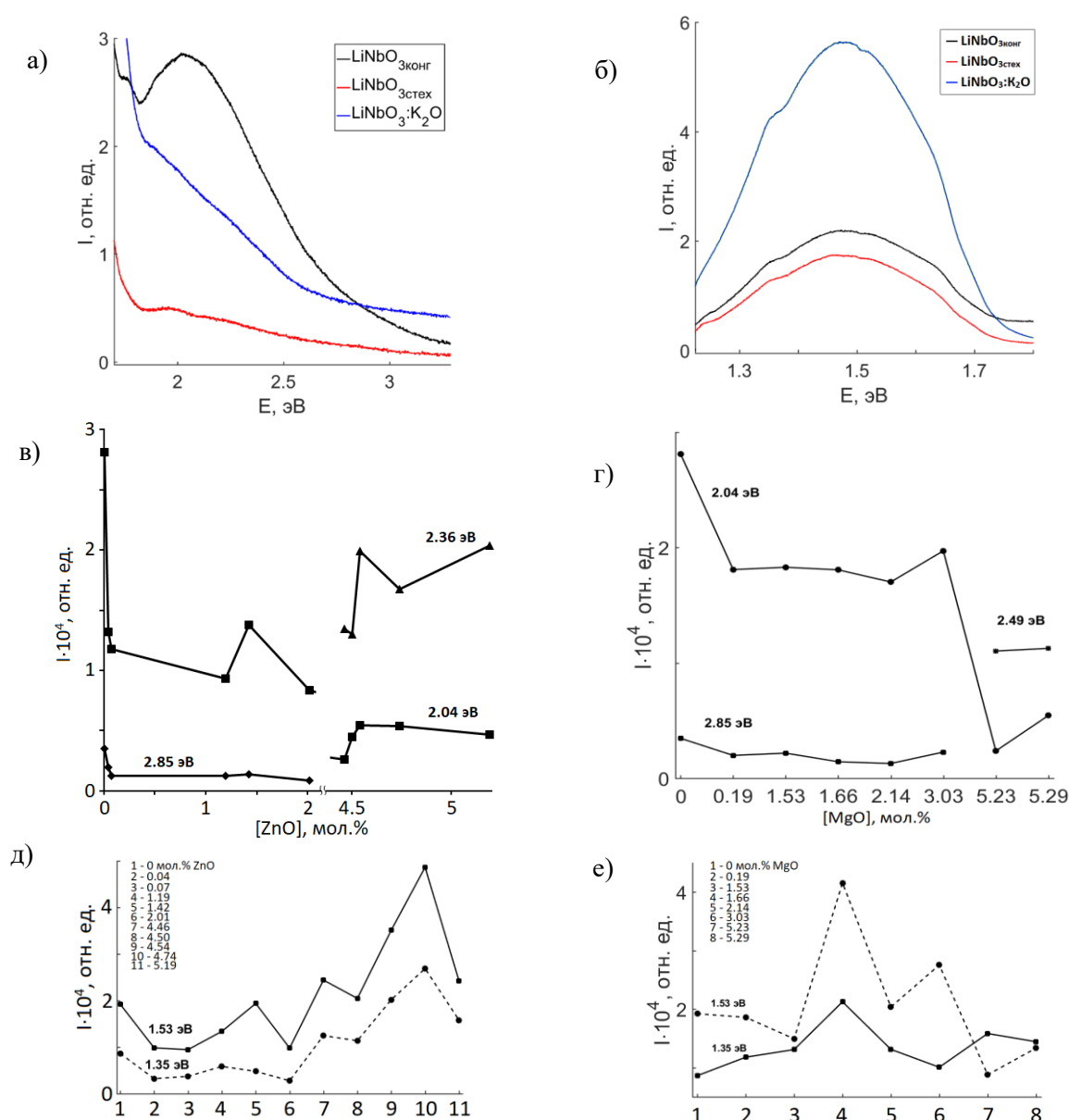


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции номинально чистых кристаллов ниобата лития в видимой (а) и ближней (б) ИК-областях. Зависимость интенсивности люминесценции центров свечения оптического диапазона от концентрации легирующей примеси (Zn, Mg) кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ (в, д) и $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}$ (г, е)

Из рисунка 1, в–г видно, что пороговый характер в изменении интенсивности свечения в видимой области спектра наблюдается при концентрациях: $\text{ZnO} \leq 2,01$ мол. % и $\text{MgO} \leq 3,03$ мол. %, где происходит уменьшение интенсивности свечения биполярона $\text{Nb}_{\text{Li}}\text{-Nb}_{\text{Nb}}$ при 2,04 эВ за счёт вытеснения атомов Nb из литиевых позиций атомами Zn/Mg. При концентрациях $\text{ZnO} \geq 4,46$ мол. % и $\text{MgO} \geq 5,23$ мол.% образуется новый центр свечения при 2,36÷2,49 эВ, который, по-видимому, связан с центрами свечения NbO_6 -групп, вблизи которого расположен дефект Me_{Li} (Me — Zn, Mg).

В ближней ИК-области интенсивность обеих полос при 1,35 и 1,53 эВ носит немонотонный характер в кристаллах $\text{LiNbO}_3\text{:Me}$ (Me — Zn, Mg) (рис. 1, д–е). В кристаллах $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ (0,04÷2,01 мол. % ZnO) в среднем снижение интенсивности данных полос относительно полос LiNbO_3 конг можно связать с уменьшением дефектов Nb_{Li} и $\text{V}_{\text{Li}}/\text{V}_{\text{Nb}}$. В кристаллах $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ (4,46÷4,74 мол. % ZnO) интенсивность полос при 1,35 и 1,53 эВ возрастает за исключением кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ (5,19 мол. % ZnO), что может

указывать на увеличение дырочных поляронов типа $O-V_{Li}$ (рис. 1, δ). В кристаллах $LiNbO_3:Mg$ ($0,19 \div 5,29$ мол. % MgO) характер изменения интенсивности полос иной: при $MgO = 0 \div 1,53$ мол. % уменьшение интенсивности люминесценции с максимумом при 1,53 эВ с одновременным увеличением интенсивности максимума при 1,35 эВ; при $MgO = 1,53 \div 1,66$ мол. % наблюдается рост интенсивности обоих максимумов; при $MgO > 1,66$ мол. % их интенсивность падает. При концентрации легирующей примеси $5,23 \div 5,29$ мол. % MgO наблюдается аномалия: интенсивность максимума 1,35 эВ преобладает над интенсивностью максимума 1,53 эВ.

На рисунке 2 представлены нормированные спектры фотолюминесценции керамик $YNbO_4$ и $GdNbO_4$, полученных по традиционной керамической технологии и технологии горячего прессования. Максимум люминесценции наблюдается при 2,6 эВ для обоих керамических образцов. На основании работы [4] природа центрального максимума обусловлена внутриконфигурационными переходами в NbO_4 -группе.

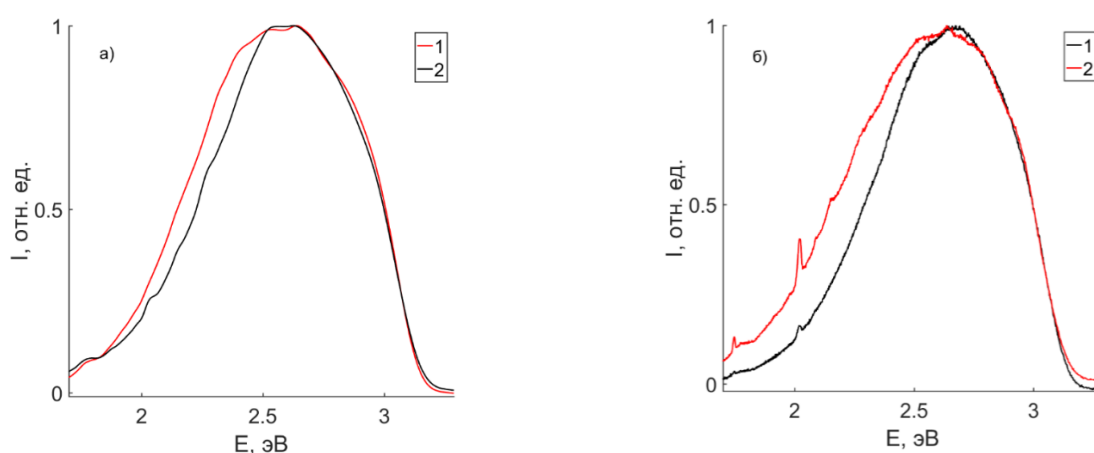


Рис. 2. Нормированные спектры фотолюминесценции керамик $YNbO_4$ (а) и $GdNbO_4$ (б), полученных по технологии горячего прессования (1) и традиционной керамической технологии (2)

Изменение технологии спекания керамики приводит к вариации ширины люминесцентного гало: в горячепрессованных образцах она больше (на 9 % для $YNbO_4$, на 16 % для $GdNbO_4$), чем в образцах, полученных высокотемпературным отжигом (см. рис. 2). Следовательно, керамики $GdNbO_4$ и $YNbO_4$, полученные высокотемпературным отжигом в воздушной атмосфере, отличаются меньшей концентрацией дефектов (центров свечения), участвующих в рекомбинационных процессах NbO_4 -групп, относительно керамик, синтезированных по технологии горячего прессования. Стоит отметить, что средний размер частиц у горячепрессованной керамики $YNbO_4$ на 9 % меньше такового значения в керамике, полученной высокотемпературным отжигом [6]. В керамике $GdNbO_4$, полученной по технологии горячего прессования, данный процент намного меньше: средний размер частиц ниже на 54 % [5].

Выводы

Установлено, что фотолюминесценция в видимой области уменьшается с ростом стехиометрии за счёт уменьшения числа биполярных пар $Nb_{Li}-Nb_{Nb}$, участвующих в эмиссии при 2,04 эВ. Кристалл $LiNbO_3$ имеет максимальную эмиссию от биполярона $Nb_{Li}-Nb_{Nb}$, а в кристалле $LiNbO_3$ она минимальна. В легированных кристаллах $LiNbO_3:Zn$ ($0,04 \div 5,19$ мол. % ZnO) и $LiNbO_3:Mg$ ($0,19 \div 5,29$ мол. % MgO) существуют пороговые значения концентраций, при которых меняются пути электронных релаксаций в видимой области, они равны 2,01 (ZnO) и 3,03 (MgO) мол. %. В ближней ИК-области вклад в изменение интенсивности фотолюминесценции носит аддитивный характер от дефектных центров свечения разной природы для номинально чистых и легированных кристаллов ниобата лития. Технология горячего прессования керамик $YNbO_4$ и $GdNbO_4$ приводит к большему числу люминесцентно-активных центров свечения относительно традиционной керамической технологии.

Список источников

1. Wong K. K. *Properties of Lithium Niobate*. London: The Institution of Engineering and Technology, 2002. P. 432.
2. Сидоров Н. В., Волк Т. Р., Маврин Б. Н., Калинин В. Т. Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны. М.: Наука, 2003. С. 255.
3. Wang S., Yang L., Cheng R., Xu Y., Shen M., Cone R. L., Thiel C. W., Tang H. X. Incorporation of erbium ions into thin-film lithium niobate integrated photonics // *Appl. Phys. Lett.* 2019. V. 116. P. 151103(1-5).
4. Blasse G., Bril A. Luminescence phenomena in compounds with fergusonite structure // *Journal of luminescence*. 1970. V. 3. P. 109–131.
5. Shcherbina O. B., Smirnov M. V., Masloboeva S. M., Andryushin K. P., Efremov V. V., Palatnikov M. N. Structure and properties of luminescence ceramics GdNbO_4 obtained by usual technology and by hot pressing // *Optik*. 2021. V. 245. P. 167683(1-8).
6. Палатников М. Н., Сидоров Н. В., Макарова О. В., Бирюкова И. В. Фундаментальные аспекты технологии сильно легированных кристаллов ниобата лития: монография. Апатиты: КНЦ РАН, 2017. С. 241
7. Palatnikov M. N., Shcherbina O. B., Smirnov M. V., Andryushin K. P., Shilkina L. A., Reznichenko L. A., Efremov V. V., Masloboeva S. M. Optimization of obtaining of translucent luminescent ceramics YNbO_4 by uniaxial hot pressing from crystal powders synthesized by sol-gel // *Optical Materials*. 2022. V. 129. P. 112541(1-6).
8. Fischer C., Wöhlecke M., Volk T., Rubinina N. Influence of the damage resistant impurities Zn and Mg on the UV-excited luminescence in LiNbO_3 // *Phys. stat. sol. (a)*. 1993. V. 137 (1). P. 247–255.
9. Ахмадуллин И. Ш., Голенищев-Кутузов В. А., Мигачев С. А., Миронов С. П. Низкотемпературная электропроводность кристаллов ниобата лития конгруэнтного состава // *Физика твердого тела*. 1998. Т. 40, № 7. С. 1307–1309.
10. Abrahams S. C., Marsh P. Defect structure dependence on composition in lithium niobate // *Acta. Cryst.* 1986. V. B42. P. 61–68.
11. Сидоров Н. В., Антонычева Е. А., Сюй А. В., Палатников М. Н. Фоторефрактивные свойства монокристаллов ниобата лития стехиометрического состава // *Кристаллография*. 2010. Т. 55, № 6. С. 1079–1084.
12. Palatnikov M. N., Kadetova A. V., Aleshina L. A., Sidorova O. V., Sidorov N. V., Biryukova I. V., Makarova O. V. Growth, structure, physical and chemical characteristics in a series of $\text{LiNbO}_3\text{:Er}$ crystals of different composition grown in one technological cycle // *Optics & Laser Technology*. 2022. V. 147. P. 107671(1-9).
13. Kostritskii S. M., Aillerie M., Margueron S., Bourson P. Gated luminescence in as-grown and reduced undoped LiNbO_3 crystals // *Journal of Physics: Conference Series*. 2013. Vol. 416. P. 012033(1-6).
14. Schirmer O. F., Thiemann O., Wöhlecke M. Defects in LiNbO_3 — I. Experimental aspects // *J. Phys. Chem. Solids*. 1991. V. 52 (1). P. 185–200.

References

1. Wong K. K. *Properties of Lithium Niobate*. London, the Institution of Engineering and Technology, 2002, p. 432.
2. Sidorov N. V., Volk T. R., Mavrin B. N., Kalinnikov V. T. *Niobat litiya: defekty, fotorefrakciya, kolebatel'nyj spektr, polyaritony* [Lithium niobate: defects, photorefractive, vibrational spectrum, polaritons]. Moscow, Nauka, 2003, p. 255. (In Russ.).
3. Wang S., Yang L., Cheng R., Xu Y., Shen M., Cone R. L., Thiel C. W., Tang H. X. Incorporation of erbium ions into thin-film lithium niobate integrated photonics. *Appl. Phys. Lett.*, 2019, vol. 116, pp. 151103(1-5).
4. Blasse G., Bril A. Luminescence phenomena in compounds with fergusonite structure. *Journal of luminescence*, 1970, vol. 3, pp. 109–131.
5. Shcherbina O. B., Smirnov M. V., Masloboeva S. M., Andryushin K. P., Efremov V. V., Palatnikov M. N. Structure and properties of luminescence ceramics GdNbO_4 obtained by usual technology and by hot pressing. *Optik*, 2021, vol. 245, pp. 167683(1-8).
6. Palatnikov M. N., Sidorov N. V., Makarova O. V., Biryukova I. V. *Fundamental'nye aspekty tehnologii sil'no legirovannykh kristallov niobata litija: monografija* [Fundamental aspects of the technology of highly alloyed lithium niobate crystals: monograph]. Apatity, KNC RAN, 2017, p. 241. (In Russ.).
7. Palatnikov M. N., Shcherbina O. B., Smirnov M. V., Andryushin K. P., Shilkina L. A., Reznichenko L. A., Efremov V. V., Masloboeva S. M. Optimization of obtaining of translucent luminescent ceramics YNbO_4 by uniaxial hot pressing from crystal powders synthesized by sol-gel. *Optical Materials*, 2022, vol. 129, pp. 112541(1-6).
8. Fischer C., Wöhlecke M., Volk T., Rubinina N. Influence of the damage resistant impurities Zn and Mg on the UV-excited luminescence in LiNbO_3 . *Phys. stat. sol. (a)*, 1993, vol. 137, no. 1, pp. 247–255.

9. Ahmadullin I. Sh., Golenishhev-Kutuzov V. A., Migachev S. A., Mironov S. P. Nizkotemperaturnaja jelektroprovodnost' kristallov niobata litija kongrujentnogo sostava [Low-temperature electrical conductivity of lithium niobate crystals of congruent composition]. *Fizika tverdogo tela* [Solid state Physics], 1998, vol. 40, no. 7. pp. 1307–1309. (In Russ.).
10. Abrahams S. C., Marsh P. Defect structure dependence on composition in lithium niobate. *Acta. Cryst.*, 1986, vol. B42, pp. 61–68.
11. Sidorov N. V., Antonycheva E. A., Sjuj A. V., Palatnikov M. N. Fotorefraktivnye svojstva monokristallov niobata litija stehiometricheskogo sostava [Photorefractive properties of lithium niobate single crystals of stoichiometric composition]. *Kristallografija* [Crystallography], 2010, vol. 55, no. 6, pp. 1079–1084. (In Russ.).
12. Palatnikov M. N., Kadetova A. V., Aleshina L. A., Sidorova O. V., Sidorov N. V., Biryukova I. V., Makarova O. V. Growth, structure, physical and chemical characteristics in a series of $\text{LiNbO}_3\text{:Er}$ crystals of different composition grown in one technological cycle. *Optics & Laser Technology*, 2022, vol. 147, pp. 107671(1-9).
13. Kostritskii S. M., Aillerie M., Margueron S., Bourson P. Gated luminescence in as-grown and reduced undoped LiNbO_3 crystals. *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, Vol. 416, pp. 012033(1-6).
14. Schirmer O. F., Thiemann O., Wöhlecke M. Defects in LiNbO_3 –I. Experimental aspects. *J. Phys. Chem. Solids*, 1991, vol. 52, no. 1, pp. 185–200.

Информация об авторах

М. В. Смирнов — инженер-исследователь;

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

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

В. Б. Пикулев — кандидат физико-математических наук, доцент.

Information about the authors

M. V. Smirnov — Research engineer;

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

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

V. B. Pikulev — PhD (Physics and Mathematics), Docent.

Статья поступила в редакцию 06.02.2023; одобрена после рецензирования 13.02.2023; принята к публикации 14.02.2023.

The article was submitted 06.02.2023; approved after reviewing 13.02.2023; accepted for publication 14.02.2023.