

Научная статья
УДК 535.375.54
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.3.007

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ КРИСТАЛЛОВ

$\text{LiNbO}_3:\text{Y}(0,24):\text{Mg}(0,63 \text{ мас. \%})$, $\text{LiNbO}_3:\text{Y}(0,46 \text{ мас. \%})$, $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}(0,5 \text{ мас. \%})$

ПО ИК-СПЕКТРАМ ПОГЛОЩЕНИЯ В ОБЛАСТИ ВАЛЕНТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ОН-ГРУПП

Любовь Александровна Бобрева¹, Николай Васильевич Сидоров²,
Михаил Николаевич Палатников³

^{1–3}Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И.В. Тананаева
Кольского научного центра РАН, г. Апатиты, Россия

¹*l.bobreva@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5367-295X>*

²*n.sidorov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1075-7421>*

³*m.palatnikov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9686-0563>*

Аннотация

Методом ИК-спектроскопии поглощения в области валентных колебаний ОН-групп исследованы монокристаллы $\text{LiNbO}_3:\text{Y}(0,24):\text{Mg}(0,63 \text{ мас. \%})$, $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}(0,5 \text{ мас. \%})$, $\text{LiNbO}_3:\text{Y}(0,46 \text{ мас. \%})$. Установлено, что полосы поглощения в диапазоне частот 3465–3488 см^{-1} , связаны с нарушением стехиометрии в кристалле из-за наличия точечных дефектов (V_{Li} , Nb_{Li}) и образованных с ними комплексных дефектов $V_{\text{Li}}\text{-OH}$, $\text{Nb}_{\text{Li}}\text{-OH}$. Показано, что часть катионов Y^{3+} при внедрении в кристаллическую решетку $\text{LiNbO}_3:\text{Y}(0,46 \text{ мас. \%})$ образует комплексные дефекты $\text{Y}_{\text{Nb}}^{3+}\text{-OH}$, $\text{Y}_{\text{Li}}^{3+}\text{-OH}$, $\text{Y}_{\text{Nb}}^{3+}$, которым соответствуют полосы поглощения с частотой 3527, 3535 см^{-1} . Вследствие большого ионного радиуса иттрия на ИК-спектре регистрируется сдвиг частот в длинноволновую область. Показано, что наличие легирующей примеси магния в кристалле двойного легирования увеличивает эффективный коэффициент распределения примеси Y в кристалле и многократно повышает люминесценцию редкоземельного иона.

Ключевые слова:

ниобат лития, монокристалл, ИК-спектры, ОН-группы, двойное легирование

Для цитирования:

Бобрева, Л. А. Исследование структурных особенностей кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Y}(0,24):\text{Mg}(0,63 \text{ мас. \%})$, $\text{LiNbO}_3:\text{Y}(0,46 \text{ мас. \%})$, $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}(0,5 \text{ мас. \%})$ по ИК-спектрам поглощения в области валентных колебаний ОН-групп / Л. А. Бобрева, Н. В. Сидоров, М. Н. Палатников // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 3. С. 44–49. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.3.007.

Original article

INVESTIGATION OF THE STRUCTURAL FEATURES OF CRYSTALS

$\text{LiNbO}_3:\text{Y}(0,24):\text{Mg}(0,63 \text{ wt. \%})$, $\text{LiNbO}_3:\text{Y}(0,46 \text{ wt. \%})$, $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}(0,5 \text{ wt. \%})$

FROM INFRARED ABSORPTION SPECTRA IN THE REGION OF VALENCE VIBRATIONS OF OH-GROUPS

Lyubov A. Bobreva¹, Nikolay V. Sidorov², Mikhail N. Palatnikov³

^{1–3}I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials
of the Kola Science Centre of the RAS, Apatity, Russia

¹*l.bobreva@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5367-295X>*

²*n.sidorov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1075-7421>*

³*m.palatnikov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9686-0563>*

Abstract

Single crystals $\text{LiNbO}_3:\text{Y}(0,24):\text{Mg}(0,63 \text{ wt. \%})$, $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}(0,5 \text{ wt. \%})$, $\text{LiNbO}_3:\text{Y}(0,46 \text{ wt. \%})$ were studied by infrared absorption spectroscopy in the area of valence vibrations of OH-groups. The absorption bands in the frequency range 3465–3488 cm^{-1} associated with the violation of stoichiometry in the crystal due to sharpened defects (V_{Li} , Nb_{Li}) and formed complex defects $V_{\text{Li}}\text{-OH}$, $\text{Nb}_{\text{Li}}\text{-OH}$. A part of Y^{3+} cations forms complex defects $\text{Y}_{\text{Nb}}^{3+}\text{-OH}$, $\text{Y}_{\text{Li}}^{3+}\text{-OH}$, $\text{Y}_{\text{Nb}}^{3+}$, which correspond to the absorption bands 3527, 3535 cm^{-1} in crystal $\text{LiNbO}_3:\text{Y}(0,46 \text{ wt. \%})$.

The introduction of magnesium alloying impurity into the double-doped crystal increases the effective distribution coefficient of the rare-earth impurity in the crystal and increases the luminescence of rare-earth ions by 8 times.

Keywords:

lithium niobate, single crystal, IR-spectra, OH-groups, double doping

For citation:

Bobreva, L. A. Investigation of the structural features of crystals $\text{LiNbO}_3\text{:Y(0,24):Mg(0,63 wt. \%)}$, $\text{LiNbO}_3\text{:Y(0,46 wt. \%)}$ $\text{LiNbO}_3\text{:Mg(0,5 wt. \%)}$ from infrared absorption spectra in the region of valence vibrations of ON-groups / L. A. Bobreva, N. V. Sidorov, M. N. Palatnikov // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 3. P. 44–49. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.3.007.

Монокристаллы ниобата лития (LiNbO_3), номинально чистые и легированные, являются в настоящее время хорошо востребованными материалами квантовой электроники, нелинейной оптики, акусто- и оптоэлектроники. LiNbO_3 — кислородно-октаэдрическая фаза нестехиометрическая переменного состава с широкой областью гомогенности на фазовой диаграмме. По этой причине монокристаллы LiNbO_3 характеризуются глубокодефектной катионной подрешеткой, состояние дефектности которой можно эффективно регулировать путем легирования и изменения стехиометрии. Исследования дефектной структуры кристаллов двойного легирования необходимы для создания оптически прочных кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Re:Mg}$ (Re — редкоземельная примесь) с малыми фоторефрактивным эффектом и фотолюминесценцией, что важно при создании материалов для преобразования лазерного излучения и активно-нелинейных лазерных сред. Двойное легирование является эффективным способом тонко регулировать геометрию кислородно-октаэдрических кластеров MeO_6 (Me — Li, Nb, вакансия V, примесный металл) структуры кристалла, упорядочение структурных единиц катионной подрешетки, определяющих сегнетоэлектрические и нелинейно-оптические свойства кристалла [1, 2]. Водород является примесью, которая всегда присутствует в кристаллах ниобата лития LiNbO_3 , выращенных по методу Чохральского в атмосфере воздуха [3, 4]. Водород в структуре кристалла LiNbO_3 образует гидроксильный комплекс OH^- . Расположение атомов водорода в структуре меняется в зависимости от отношения $[\text{Li}]/[\text{Nb}]$ и концентрации легирующей добавки [3, 4]. Присутствие OH-групп влияет на такие свойства кристалла LiNbO_3 , как фотолюминесценция, фоторефракционная термофиксация, темновая проводимость, фоторефрактивная чувствительность [3].

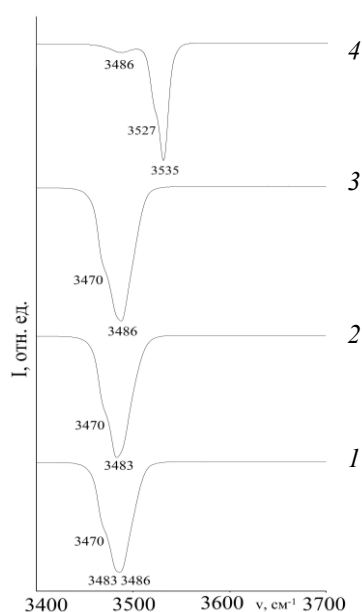
В данной работе по изменениям в ИК-спектрах поглощения в области валентных колебаний OH⁻-групп выполнены сравнительные исследования тонких особенностей структуры монокристаллов двойного легирования $\text{LiNbO}_3\text{:Y(0,24):Mg(0,63 мас. \%)}$ и одинарного $\text{LiNbO}_3\text{:Mg(0,5 мас. \%)}$, $\text{LiNbO}_3\text{:Y(0,46 мас. \%)}$. Проведен анализ особенностей вхождения и влияния легирующих примесей Y^{3+} и Mg^{2+} на концентрацию OH⁻-групп и характер комплексных дефектов, связанных с OH⁻-группами в кристаллах.

Методика эксперимента

Кристаллы $\text{LiNbO}_{3\text{конгр}}$, $\text{LiNbO}_3\text{:Y(0,24):Mg(0,63 мас. \%)}$, $\text{LiNbO}_3\text{:Mg(0,5 мас. \%)}$, $\text{LiNbO}_3\text{:Y(0,46 мас. \%)}$ и были выращены методом Чохральского по единой технологии, подробно описанной в работе [2]. Осуществлялось прямое легирование конгруэнтного (48,6 мол. % Li_2O) расплава ниобата лития. Все монокристаллы монодоменизированы методом высокотемпературного электродиффузионного отжига при охлаждении образцов со скоростью 20 град/ч в температурном интервале от ~1240–890 °C в условиях приложения электрического напряжения. Контроль степени монодоменности осуществлялся методом анализа частотной зависимости электрического импеданса и путем определения величины статического пьезомодуля ($d_{33\text{ст}}$) кристаллической були. Образцы для исследования спектров ИК-поглощения вырезались из монодоменизированных кристаллов в форме прямоугольных параллелепипедов (размеры ~8×7×6 мм³), ребра которых совпадали по направлению с кристаллофизическими осями X, Y, Z (Z — полярная ось кристалла). Грани параллелепипедов тщательно полировались. Регистрация спектров производилась с помощью спектрометра IFS 66 v/s фирмы Bruker.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены спектры ИК-поглощения в области валентных колебаний OH⁻-групп монокристаллов $\text{LiNbO}_{3\text{конгр}}$, $\text{LiNbO}_3\text{:Y(0,24):Mg(0,63 мас. \%)}$, $\text{LiNbO}_3\text{:Mg(0,5 мас. \%)}$, $\text{LiNbO}_3\text{:Y(0,46 мас. \%)}$. В спектре ИК-поглощения кристаллов $\text{LiNbO}_{3\text{конгр}}$, $\text{LiNbO}_3\text{:Y(0,24):Mg(0,63 мас. \%)}$



Спектры ИК-поглощения монокристаллов:

- 1 — LiNbO_3 конгр;
- 2 — $\text{LiNbO}_3:\text{Y}(0,24):\text{Mg}(0,63 \text{ мас. \%})$;
- 3 — $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}(0,5 \text{ мас. \%})$;
- 4 — $\text{LiNbO}_3:\text{Y}(0,46 \text{ мас. \%})$

и $\text{LiNbO}_3\text{Mg}(0,5 \text{ мас. \%})$ в области валентных колебаний OH^- -групп проявляются полосы поглощения с частотами 3470, 3482, 3483 и 3486 см^{-1} . Проявление данных полос в диапазоне частот 3465–3488 см^{-1} связано с нарушением стехиометрии в кристалле из-за точечных дефектов (V_{Li} , Nb_{Li}) и образованных с ними комплексных дефектов $\text{V}_{\text{Li}}\text{-OH}$, $\text{Nb}_{\text{Li}}\text{-OH}$. Основными точечными дефектами в кристалле LiNbO_3 являются V_{Li} и Nb_{Li} [5]. В конгруэнтном кристалле LiNbO_3 ($[\text{Li}]/[\text{Nb}] = 0,946$) дефект V_{Li} является результатом дефицита лития. Дефекты Nb_{Li} образуются преимущественно в результате избытка ниобия, который занимает основные позиции лития в кристаллической решетке LiNbO_3 . При нарушении стехиометрии и легировании в кристалле LiNbO_3 изменяются длины химических связей Li-O , Nb-O , Me-O и геометрия кислородно-октаэдрических кластеров MeO_6 . Ковалентные связи Nb-O значительно сильнее, чем ионные связи Li-O [6]. Различие прочности химических связей и почти одинаковых ионных радиусов Li^+ (0,066 нм) и Nb^{5+} (0,069 нм) приводит к тому, что в нестехиометрических кристаллах дополнительные ионы Nb занимают основные позиции Li, создавая точечные дефектные центры $\text{Nb}_{\text{Li}}^{4+}$. Разность зарядов ионов Li^+ и Nb^{5+} и легирующих катионов приводит к появлению дополнительных точечных

дефектов V_{Li}^- , которые необходимы для поддержания зарядовой нейтральности кристаллической решетки LiNbO_3 . Наряду с точечными дефектами V_{Li}^- и $\text{Nb}_{\text{Li}}^{4+}$, в кристаллической решетке существуют и другие дефекты: атом водорода, связанный с атомом кислорода водородной связью, формирует OH^- -комплекс [3, 4]; дефект Nb_{Li} путем захвата электрона образует свободный полярон ($\text{Nb}_{\text{Nb}}^{4+}$), полярон малого радиуса ($\text{Nb}_{\text{Li}}^{3+}$), биполярон ($\text{Nb}_{\text{Li}}^{3+} - \text{Nb}_{\text{Nb}}^{4+}$), — уверенно проявляющиеся в спектрах фотолюминесценции [1, 7]. Таким образом, отход от стехиометрии приводит к формированию высокой степени структурного беспорядка и созданию большого количества точечных и комплексных дефектов в структуре кристалла LiNbO_3 . При этом точечные дефекты катионной подрешетки нарушают порядок локализации катионов и вакантных октаэдров (Li^+ , Nb^{5+} , вакансия) вдоль полярной оси, образуют в запрещенной зоне оптически активные энергетические подуровни и увеличивают фоторефрактивный эффект, электрическую проводимость в кристалле.

В ИК-спектре поглощения кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Y}(0,46 \text{ мас. \%})$ наблюдается сдвиг частот в высокочастотную область и расщепление полосы поглощения на несколько компонентов 3486, 3527, 3535 см^{-1} (рис.) Появление полос поглощения в диапазоне частот 3490–3585 см^{-1} связано с изменением особенностей вхождения легирующей примеси Y^{3+} в структуру кристалла, вследствие образования комплексных дефектов ($\text{Y}_{\text{Nb}}^{3+}\text{-OH}$, $\text{Y}_{\text{Li}}^{3+}\text{-OH-Y}_{\text{Nb}}^{3+}$). Катионы Y^{3+} при внедрении в кристаллическую решетку LiNbO_3 , вследствие большего их ионного радиуса (0,106 нм) по сравнению радиусами ионов Nb^{5+} (0,068 нм) и Li^+ (0,066 нм), значительно искажают кислородные октаэдры и увеличивают разупорядочение катионной подрешетки вдоль полярной оси, что приводит к сдвигу частот на ИК-спектре в длинноволновую область.

Из спектра ИК-поглощения можно рассчитать концентрацию OH^- -групп по методу Клавира [8]. Точность расчета определяется сложностью спектра ИК-поглощения в области валентных колебаний OH^- -групп.

Данные таблицы показывают, что более высокая концентрация OH^- -групп характерна для кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}(0,5 \text{ мас. \%})$. В кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Y}(0,46 \text{ мас. \%})$ концентрация OH^- -групп чуть больше, чем в кристалле LiNbO_3 конгр. Поскольку легирующая примесь Y^{3+} имеет больший ионный

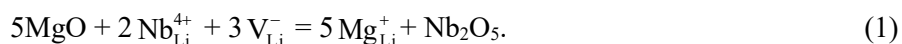
Концентрация ОН-групп в исследуемых образцах

Кристалл	Концентрация ОН-групп (см ⁻³)
LiNbO ₃ контр	$3,26 \cdot 10^{17}$
LiNbO ₃ :Y(0,24):Mg(0,63 мас. %)	$5,83 \cdot 10^{17}$
LiNbO ₃ :Mg (0,5 мас. %)	$5,90 \cdot 10^{17}$
LiNbO ₃ :Y(0,46 мас. %)	$3,87 \cdot 10^{17}$

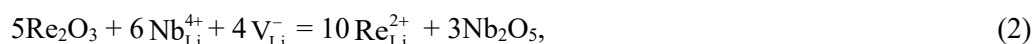
радиус (0,106 нм), в кристалле LiNbO₃:Y(0,46 мас. %) лишь небольшая часть редкоземельных ионов участвует в формировании дефектного комплекса Y-ОН и влияет на концентрацию ОН-групп. Увеличение концентрации дефектов, обусловленных присутствием ОН-групп в кристаллах LiNbO₃:Mg(0,5 мас. %) и LiNbO₃:Y(0,24):Mg(0,63 мас. %) по сравнению

с другими исследованными кристаллами, связано с разными механизмами вхождения легирующих примесей в структуру кристалла.

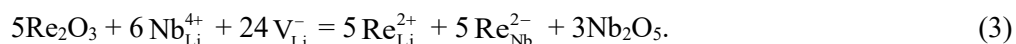
В кристаллах двойного легирования редко- и щелочноземельной примесью сильно изменяется состояние дефектности структуры кристалла, что можно использовать для усиления интенсивности люминесценции редкоземельных ионов в кристалле LiNbO₃ [9]. Эффективный коэффициент распределения трехвалентной примеси довольно низкий ($k_{эф} = 0,1$), он несколько увеличивается при введении магния в качестве второй легирующей примеси [10]. В кристаллах одинарного легирования LiNbO₃ избыток дополнительных ионов Nb (точечных дефектных центров Nb_{Li}⁴⁺) исчезает при легировании катионами магния вблизи концентрационного порога приблизительно 0,5 мас. % MgO, которые замещают эти позиции, что приводит к некоторому упорядочению структурных единиц катионной подрешетки и образованию «стехиометрически чистого» (без точечных дефектов Nb_{Li}⁴⁺) кристалла LiNbO₃:Mg(0,5 мас. %). В исследованиях [10] показано, что в кристаллической структуре LiNbO₃ существует четыре позиции, которые может занять трехвалентная легирующая примесь: две октаэдрические основные позиции Li и Nb, свободный октаэдр и тетраэдрическая вакантная позиция. Трехвалентные редкоземельные примеси влияют на фотопроводимость сильнее, чем двухвалентные, хотя уровень легирования трехвалентных примесей для получения таких эффектов намного меньше. Это обусловлено различием условий зарядовой компенсации. Согласно модели Li-вакансий, вхождение легирующей двухвалентной примеси можно описать следующим образом [11]:



Вхождение трехвалентной редкоземельной примеси (Re³⁺) возможно как в позиции лития [25]:



так и в позиции ниобия, образуя самокомпенсирующуюся пару.



Эксперименты, представленные в работах [12, 13], показали, что редкоземельные ионы расположены в октаэдрических позициях Li, но вследствие их большого размера смещены от центра к ближайшей кислородной плоскости на 0,46 Å. В исследованиях [15] считается, что редкоземельные ионы в структуре кристалла LiNbO₃ занимают основные позиции Nb⁵⁺, вынуждая Nb⁵⁺ внедряться в вакантные октаэдры, создавая кластеризацию в катионной подрешетке и, тем самым увеличивая разупорядочение катионов и вакансий вдоль полярной оси. Солегирование катионами Y³⁺ кристалла LiNbO₃:Y:Mg в малых количествах приводит к небольшому разупорядочению структуры. В то время как легирование катионами Mg²⁺ кристалла LiNbO₃:Y:Mg приводит к сильному изменению внутренней дефектной структуры кристалла, оно так же является эффективным способом получения яркой люминесценции редкоземельных ионов в кристаллах двойного легирования LiNbO₃:Y:Mg. Поскольку катионы магния в кристалле LiNbO₃:Re:Mg замещают позиции точечных дефектных центров Nb_{Li}⁴⁺, меняя группу дефектов с (Nb_{Li})⁴⁺-4(V_{Li})⁻ на (Mg_{Li})⁺-4(V_{Li})⁻, согласно модели Li-вакансий. В результате солегирования магнием концентрация точечных дефектов Nb_{Li} снижается, следовательно, уменьшается и количество центров тушения (Nb_{Li}). Таким образом, больше энергии будет передано ионам Re³⁺ в кристаллах двойного легирования, а значит, излучение ионов Re³⁺ усилится. Согласно

данным работы [9], интенсивность люминесценции ионов Re^{3+} в кристалле $\text{LiNbO}_3\text{:Re:Mg}$ почти в 8 раз больше, чем в кристалле одинарного легирования $\text{LiNbO}_3\text{:Re}$.

Заключение

Исследованы спектры ИК-поглощения в области валентных колебаний OH^- -групп кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Y(0,24):Mg(0,63 мас. \%)}$, $\text{LiNbO}_3\text{:Mg(0,5 мас. \%)}$, $\text{LiNbO}_3\text{:Y(0,46 мас. \%)}$, полученных путем прямого легирования расплава ниобата лития конгруэнтного состава. Обнаружено, что в спектрах проявляются полосы поглощения в диапазоне частот $3465\text{--}3488\text{ см}^{-1}$, связанные с нарушением стехиометрии кристалла из-за точечных дефектов (V_{Li} , Nb_{Li}) и образованных с ними комплексных дефектов $\text{V}_{\text{Li}}\text{-OH}$, $\text{Nb}_{\text{Li}}\text{-OH}$. Для ИК-спектра кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:Y(0,46 мас. \%)}$ наблюдается сдвиг частот вследствие большего ионного радиуса иттрия, чем у других ионов в кристаллической решетке LiNbO_3 . Появление новых полос поглощения $3527, 3535\text{ см}^{-1}$ связано с участием лишь небольшой части катионов иттрия в формировании комплексных дефектов $\text{Y}_{\text{Nb}}^{3+}\text{-OH}$, $\text{Y}_{\text{Li}}^{3+}\text{-OH-Y}_{\text{Nb}}^{3+}$. По этой причине расчетная концентрация OH^- -групп самая низкая среди исследованных нами легированных кристаллов. Легирование катионами магния (0,5 мас. % MgO) приводит к образованию «стехиометрически чистого» (без точечных дефектов $\text{Nb}_{\text{Li}}^{4+}$) кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}$, но повышает концентрацию OH^- -групп в кристалле. Кристалл двойного легирования $\text{LiNbO}_3\text{:Y(0,24):Mg(0,63 мас. \%)}$ в ряду исследованных кристаллов характеризуется наиболее дефектной структурой, что подтверждается также данными спектроскопии комбинационного рассеяния света [1]. Введение катионов Y^{3+} в кристалл $\text{LiNbO}_3\text{:Re:Mg}$ приводит к небольшому разупорядочению структуры, в то же время легирующая примесь магния увеличивает эффективный коэффициент распределения редкоземельной примеси в кристалле и существенно повышает люминесценцию редкоземельных ионов.

Список источников

1. Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны / Н. В. Сидоров [и др.]. М.: Наука, 2003. 256 с.
2. Фундаментальные аспекты технологии сильно легированных кристаллов ниобата лития / М. Н. Палатников [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 2017. 241 с.
3. Growth, defect structure, and THz application of stexiometric lithium niobate / K. Lengyel [et al.] // Appl. Phys. Rev. 2015. Vol. 2. P. 040601–040628.
4. Hydrogen in lithium niobate / J. M. Cabrera [et al.] // Advances in Physics. 1996. Vol. 45, No. 5. P. 349–392.
5. Comparative study of defect structures in lithium niobate with different compositions / N. Iyi [et al.] // J. Solid State Chemistry. 1992. Vol. 101. P. 340–352.
6. Abrahams S. C., Reddy J. M., Bernstein J. L. Ferroelectric Lithium Niobate. Single Crystal X-Ray Diffraction study at $24\text{ }^\circ\text{C}$ // J. Physics and Chemistry of Solids. 1966. V. 27. № 6/7. P.997-1012
7. Sommerfeldt R., Holtman L., Kratzig E., Grabmaier B. C. The light-induced charge transport in $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}$, Fe crystals // Ferroelectrics. 1989. Vol. 92. P. 219–225.
8. Klauer S., Wohlecke M., Kapphan S. // Phys. Rev. B. 1992. Vol. 45. P. 2786.
9. Zhao L.-J., Yang J., Xu J.-J. Enhancement of Er^{3+} Luminescence in $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}$ Crystals // Chin. Phys. Lett. 2001. Vol. 18, No. 9. P. 1205–1210
10. Site-selective spectroscopy of Nd^{3+} in $\text{LiNbO}_3\text{:Nd}$ and $\text{LiNbO}_3\text{:Nd, Mg}$ crystals / G. Lifante [et al.] // Chem. Phys. Lett. 1991. Vol. 176. No. 5. P.483–488.
11. Optical-damage-resistant impurities (Mg, Zn, In, Sc) in lithium niobate / T. Volk [et al.] // Ferroelectrics. 1996. Vol. 183. P. 291–300.
12. Rebouta L. [et al.] // Phys. Rev. B. 1993. Vol. 48. P. 3600.
13. Lorenzo A. [et al.] // Appl. Phys. Lett. 1995. Vol. 67, No. 25. P. 3735.
14. Burns G., O’Kane D. F., Title R. S. Optical and Electron-Spin-Resonance Spectra of Yb^{3+} , Nd^{3+} , and Cr^{3+} , in LiNbO_3 and LiTaO_3 // Phys. Rev. 1968. Vol. 167. P. 314–320.

References

1. Sidorov N. V., Voalk T. R., Mvrin B. N., Kalinnikov V. T. *Niobat litiya: defecty, fotorefractciya, kolabatelniy spektr, polyaritony* [Lithium Niobate: Defects, Photorefraction, Vibrational Spectra Polaritons]. Moscow, Nauka, 2003, 255 p.

2. Palatnikov M. N., Sidorov N. V., Makarova O. V., Biryukova I. V. *Fyndamentalnye aspekty texnologii silno legirovannykh kristallov niobata litiya* [Fundamental aspects of technology of heavily alloyed lithium niobate crystals]. Apatity, KSC RAS, 2017, 241 p.
3. Lengyel K., Peter A., Kovacs L., Corradi G., Palfavi L., Hebling J., Unferdorben M., Dravecz G., Hajdara I., Szaller Zs., Polgar K. Growth, defect structure, and THz application of cexiometric lithium niobate. *Applied Physics Reviews*, 2015, Vol. 2, pp. 040601–040628.
4. Cabrera J. M., Olivares J., Carrascosa M., Rams J., Müller R. and Diéguez E. Hydrogen in lithium niobate. *Advances in Physics*, 1996, Vol. 45, No. 5, pp. 349–392.
5. Iyi N., Kitamura K., Izumi F., Yamamoto J. K., Hayashi T., Asano H., Kimura S. Comparative study of defect structures in lithium niobate with different compositions. *Journal Solid State Chemistry*, 1992, Vol. 101, pp. 340–352.
6. Abrahams S. C., Reddy J. M., Bernstein J. L. Ferroelectric Lithium Niobate. Single Crystal X-Ray Diffraction study at 24 °C. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1966, Vol. 27, No. 6/7, pp. 997–1012.
7. Sommerfeldt R., Holtman L., Kratzig E., Grabmaier B. C. The light-induced charge transport in LiNbO₃:Mg, Fe crystals. *Ferroelectrics*, 1989, Vol. 92, pp. 219–225.
8. Klauer S., Wöhlecke M., Kapphan S. *Physics Review. B.*, 1992, Vol. 45, pp. 2786.
9. Zhao L., Yang J., Xu J. Enhancement of Er³⁺ Luminescence in LiNbO₃:Mg Crystals. *Chinese Physics Letters*, 2001, Vol. 18, No. 9, pp. 1205–1210.
10. Lifante G., Cussid F., Jaque F., Sanz-Garcia J. A. Site-selective spectroscopy of Nd³⁺ in LiNbO₃:Nd and LiNbO₃:Nd, Mg crystals. *Chemical Physics Letters*, 1991, Vol. 176, No. 5, pp. 483–488.
11. Volk T., Wohlecke' M., Rubinina N., Reichert A., Razumovski N. Optical-damage-resistant impurities (Mg, Zn, In, Sc) in lithium niobate. *Ferroelectrics*, 1996, Vol. 183, pp. 291–300.
12. Rebouta L., Smulders P. J. M., Boerma D. O., Aguillo F., Lopezda Silva M. F., Soares J. C. *Physics Review. B.*, 1993, Vol. 48, pp. 3600.
13. Lorenzo A., Jaffrezic H., Roux B., Boulon G., Garcia-Sole J. *Applied Physics Letters*, 1995, Vol. 67, No. 25, pp. 3735.
14. Burns G., O’Kane D. F., Title R. S. Optical and Electron-Spin-Resonance Spectra of Yb³⁺, Nd³⁺, and Cr³⁺ in LiNbO₃ and LiTaO₃. *Physics Review*, 1968, Vol. 167, pp. 314–320.

Информация об авторах

Л. А. Бобрева — кандидат технических наук, научный сотрудник;

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

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

Information about the authors

L. A. Bobreva — PhD (Engineering), Researcher;

N. V. Sidorov — Dr. Sc. (Physics), Chief Researcher;

M. N. Palatnikov — Dr. Sc. (Engineering), Chief Researcher.

Статья поступила в редакцию 30.01.2023; одобрена после рецензирования 31.01.2023; принята к публикации 01.02.2023.

The article was submitted 30.01.2023; approved after reviewing 31.01.2023; accepted for publication 01.02.2023.