УДК 535.543.2:549.752/.757:546.34 *Оригинальная статья*

Особенности дефектной структуры монокристаллических пластин $LiNbO_3$:Tb с послепороговой концентрацией ионов тербия

Л.А. Бобрева[1,2], Н.В. Сидоров[1], А.Ю. Пятышев[3], М.Н. Палатников[1]

[1]Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева – обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр РАН»
184209, Россия, Мурманская область, Академгородок, 26а
[2]ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет»
1833038, Россия, Мурманск, ул. Капитана Егорова, 15
[3]ФГБУН «Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН»
119333, Россия, Москва, Ленинский проспект, 53
l.bobreva@ksc.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.567

Аннотация: Методом спектроскопии инфракрасного поглощения в области валентных колебаний OH^--групп проведен сравнительный анализ дефектной структуры монокристаллических пластин *Z*-ориентации *$LiNbO_3$:Tb* (2,25 мас.%) и *$LiNbO_3$:Tb* (2,9 мас.%). Установлено, что сложный многокомпонентный профиль структуры спектров в диапазоне 3000-4000 $см^{-1}$ формируется не только за счёт локальных колебаний гидроксильных групп вблизи различных дефектов решетки, но и вследствие наложения слабых электронных *f-f* переходов ионов Tb^{3+}, которые становятся разрешенными под действием кристаллического поля. Путем разложения спектров идентифицированы полосы поглощения, соответствующие различным дефектам: полосы поглощения вблизи 3466 $см^{-1}$ связаны с нарушением стехиометрии, а полосы поглощения в диапазоне 3490-3600 $см^{-1}$ с механизмом вхождения легирующей примеси. Показано, что образец с меньшим содержанием тербия (2,25 мас.%) характеризуется более высоким значением объемной концентрации OH^--групп, по сравнению с образцом, где содержание тербия (2,9 мас.%). Данный эффект связано с изменением стехиометрии и формированием двух видов комплексных дефектов: (V_{Li}^-)-*OH* и 5(Tb_{Li}^{2+})-2(V_{Nb}^{5-})-*OH*. Полученные результаты позволяют уточнить механизмы дефектообразования и могут служить основой для оптимизации технологических режимов получения кристаллов, предназначенных для создания нелинейно-оптических элементов с контролируемыми доменными структурами.

Ключевые слова: ниобат лития, тербий, спектр инфракрасного поглощения, электронные переходы, OH^--группы, комплексные дефекты.

Бобрева Любовь Александровна – к.т.н., научный сотрудник сектора колебательной спектроскопии и структурных исследований лаборатории материалов электронной техники, Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева – обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», доцент кафедры физики, биологии и инженерных технологий ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет»

Сидоров Николай Васильевич – д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник с исполнением обязанностей заведующего сектора колебательной спектроскопии и структурных исследований лаборатории материалов электронной техники Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева – обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр РАН»

Пятышев Александр Юрьевич – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории комбинационного рассеяния света ФГБУН «Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН»

Палатников Михаил Николаевич – д.т.н., главный научный сотрудник с сохранением обязанностей заведующего, лаборатория материалов электронной техники Институт химии и технологии редких

© Л.А. Бобрева, Н.В. Сидоров, А.Ю. Пятышев, М.Н. Палатников, 2026

элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева – обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр РАН»

Original paper

Features of the defect structure of $LiNbO_3$:Tb single-crystal plates with a post-threshold concentration of terbium ions

L.A. Bobreva[1,2], N.V. Sidorov[1], A.Yu. Pyatyshev[3], M.N. Palatnikov[1]

[1]*Tananaev Institute of Chemistry – Subdivision of the Federal Research Centre «Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences», Apatity, Russia*

[2]*Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia*

[3]*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

DOI: 10,26456/pcascnn/2026.17.567

Abstract: A comparative analysis of the defect structure of Z-oriented $LiNbO_3$*:Tb* (2,25 wt.%) and $LiNbO_3$*:Tb* (2,9 wt.%) single-crystal plates was performed using infrared absorption spectroscopy in the region of OH^--group stretching vibrations. It was found that the complex multicomponent profile of the spectral structure in the 3000-4000 cm^{-1} range is formed not only by local vibrations of hydroxyl groups near various lattice defects, but also due to the superposition of weak electronic f-f transitions of Tb^{3+} ions, which become allowed under the action of the crystal field. By decomposing the spectra, absorption bands corresponding to various defects were identified: absorption bands near 3466 cm^{-1} are associated with a violation of stoichiometry, and absorption bands in the 3490-3600 cm^{-1} range with the mechanism of dopant incorporation. It was shown that the sample with a lower terbium content (2,25 wt.%) is characterized by a higher volume concentration of OH^- groups, compared to the sample with a terbium content of 2,9 wt.%. This effect is associated with a change in stoichiometry and the formation of two types of complex defects: (V_{Li}^-)-*OH* and 5(Tb_{Li}^{2+})-2(V_{Nb}^{5-})-*OH*. The obtained results allow us to clarify the mechanisms of defect formation and can serve as a basis for optimizing the technological modes for producing crystals intended for the creation of nonlinear optical elements with controlled domain structures.

Keywords: lithium niobate, terbium, infrared absorption spectrum, electronic transitions, OH^- groups, complex defects.

Lyubov A. Bobreva – Ph. D., Researcher, Vibrational Spectroscopy Sector of the Electronic Engineering Materials Laboratory, Tananaev Institute of Chemistry – Subdivision of the Federal Research Centre «Kola Science Centre of the RAS»; Assistant Professor, Department of Physics, Biology and Engineering Technologies, Murmansk Arctic University, ORCID 0000-0001-5367-295X

Nikolay V. Sidorov – Dr. Sc., Professor, Chief Researcher and as Head of Vibrational Spectroscopy Sector of the Electronic Engineering Materials Laboratory, Tananaev Institute of Chemistry – Subdivision of the Federal Research Centre «Kola Science Centre of the RAS», ORCID: 0000-0003-1075-7421

Alexander Yu. Pyatyshev – Ph. D., Senior Researcher, Raman laboratories, P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, ORCID: 0000-0001-6663-9737

Mikhail N. Palatnikov – Dr. Sc., Chief Researcher and as Head of the Electronic Engineering Materials Laboratory, Tananaev Institute of Chemistry – Subdivision of the Federal Research Centre «Kola Science Centre of the RAS», ORCID: 0000-0001-9686-0563

Поступила в редакцию/received: 30.07.2026; после рецензирования/revised: 10.09.2026; принята/accepted: 19.09.2026.

1. Введение

Ион Tb^{3+} играет важную роль в создании материалов для оптоэлектронных устройств на основе изоморфных нелинейно-оптических кристаллов ниобата лития $LiNbO_3$ и танталата лития $LiTaO_3$, благодаря своим хорошим люминесцентным свойствам, основанным на переходах $4f-4f$ или $5d-4f$ [1]. Легированные тербием кристаллы $LiNbO_3$ и $LiTaO_3$

обладают эффектом фотоиндуцированного изменения показателя преломления (эффект фоторефракции) и интенсивной люминесценцией в синей и зелёной областях спектра, а также длительным послесвечением [2-4]. Существенным ограничивающим фактором для применений кристалла $LiNbO_3:Tb$ в оптике является то, что, кристаллы $LiNbO_3:Tb$ любого состава обладают сложной дефектной структурой. Ранее [5] было установлено наличие концентрационного порога (2,2-2,3 мас.% ионов Tb^{3+}), при переходе через который возрастает дефектность, ухудшается структурное совершенство и композиционная однородность кристаллов $LiNbO_3:Tb$, что проявляется, в том числе, в уменьшении температуры Кюри и в увеличении эффекта фоторефракции. При этом величина коэрцитивного поля в послепороговых кристаллах $LiNbO_3:Tb$ меньше, чем в допороговых кристаллах [6]. Этот факт важен для разработки на основе послепороговых кристаллов $LiNbO_3:Tb$ (≥2,2 мас.%) нелинейно-оптических функциональных элементов для преобразования лазерного излучения с периодически поляризованными доменами субмикронных размеров с плоскими границами, формируемых на ориентированных монокристаллических пластинах [7, 8]. При этом для изготовления элементов необходимы пластины $LiNbO_3:Tb$ высокого оптического качества и структурного совершенства с низким коэрцитивным полем.

2. Постановка задачи и подготовка образцов

В данной работе методом спектроскопии инфракрасного (ИК) поглощения в области валентных колебаний OH^--групп исследованы особенности состояния дефектности монокристаллических пластин $LiNbO_3:Tb$ 2,25 мас.% и $LiNbO_3:Tb$ 2,9 мас.% с послепороговой концентрацией ионов тербия. Данные монокристаллы $LiNbO_3:Tb$ выращивались методом Чохральского в воздушной атмосфере из платиновых тиглей диаметром 75 мм. Образцы для исследований были вырезаны из монокристаллических буль и представляли собой пластины Z-ориентации с размерами 8,30×10,11×2,27 мм^3 для $LiNbO_3:Tb$ 2,25 мас.% и 8,09×11,43×1,55 мм^3 для $LiNbO_3:Tb$ 2,9 мас.%. Регистрация спектров ИК-поглощения производилась с помощью спектрометра Bruker VERTEX 70x (Bruker, Germany) со спектральным разрешением 1,0 см$^{-1}$. Измерения проводились при давлении менее 1 гПа и комнатной температуре.

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены ИК-спектры поглощения в области валентных колебаний OH^--групп послепороговых пластин $LiNbO_3:Tb$

2,25 мас.% и $LiNbO_3:Tb$ 2,9 мас.%. Из рис. 1 видно, что спектры ИК-поглощения пластин $LiNbO_3:Tb$ 2,25 мас.% и $LiNbO_3:Tb$ 2,9 мас.% в диапазоне частот 3000-4000 см$^{-1}$ имеют многокомпонентную структуру. В Таблице 1 представлены основные параметры спектральных линий, полученные после разложения многокомпонентного спектра, наблюдаемого в диапазоне частот 3000-4000 см$^{-1}$, на составляющие, а также дана объёмная концентрация OH^--групп в кристаллах, определенная нами методом Клавира [9]. Многокомпонентный вид спектра ИК-поглощения в диапазоне частот 3000-4000 см$^{-1}$ может быть обусловлен тем, что, согласно данным работы [4] в спектре ИК-поглощения кристаллов $LiNbO_3:Tb$, возможно проявление электронных $f-f$ переходов, которые запрещены правилами отбора для изолированного иона Tb^{3+}, но в некоторых случаях, например, под влиянием особенностей кристаллического поля на ион Tb^{3+}, этот запрет может быть снят. Линии, соответствующие таким $f-f$ переходам могут существенно перекрываются с линиями, соответствующими валентным колебаниям OH^--групп.

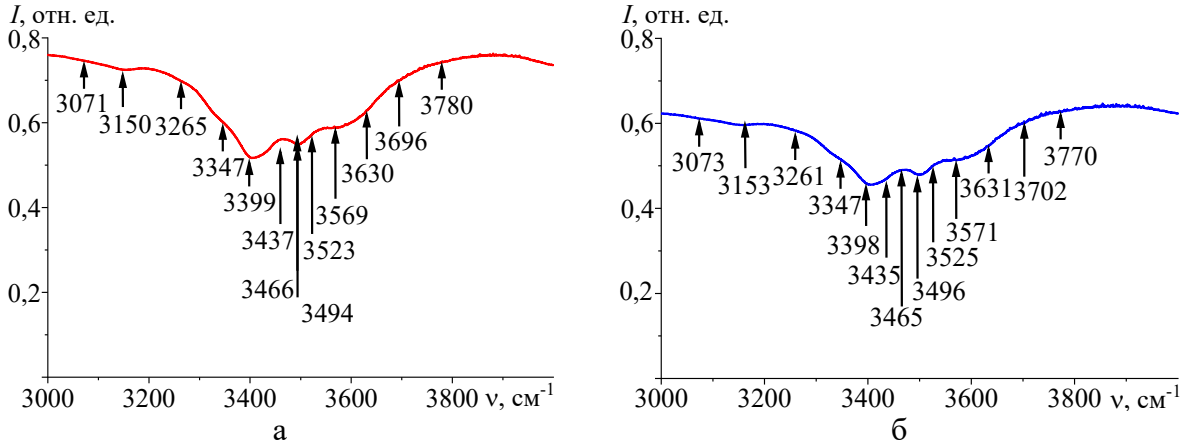

Рис. 1 Спектры ИК-поглощения пластин $LiNbO_3:Tb$ 2,25 мас.% (а) и $LiNbO_3:Tb$ 2,9 мас.%. (б) в диапазоне частот 3000-4000 см$^{-1}$.

Форма, расположение и количество линий в спектре ИК-поглощения кристаллов $LiNbO_3$ разного состава, соответствующих валентным колебаниям OH^--групп, зависит от стехиометрии (величины R) и концентрации легирующей примеси в кристалле [10, 11]. В спектре ИК-поглощения строго стехиометрического кристалла $LiNbO_3$ ($R=1$) в котором форма кислородных октаэдров O_6 близка к форме идеального октаэдра, присутствует только одна узкая линии с частотой 3466 см$^{-1}$ [10]. В спектре ИК-поглощения нестехиометрических ($R\neq 1$) кристаллов $LiNbO_3$ (чистых и легированных), помимо линии с частотой 3466 см$^{-1}$, присутствует ещё несколько линий [11]. При этом количество линий определяется

особенностями отклонения формы кислородных октаэдров O_6 нестехиометрических кристаллов от формы идеального октаэдра.

Этот факт позволяет линии в спектре ИК-поглощения кристаллов $LiNbO_3:Tb$, соответствующие валентным колебаниям OH^--групп, объединить в несколько групп. Первая группа линий с частотами в диапазоне 3460-3489 см$^{-1}$ связана с нарушением стехиометрии в кристалле, вследствие образования точечных дефектов (V_{Li}^-) и (Nb_{Li}^{4+}) и увеличением вследствие этого величины квазиупругой постоянной $O-H$ связи. Вследствие чего повышается частота линии, соответствующей валентным колебаниям OH^--групп. Действительно, из рис. 1 видно, что в спектре ИК-поглощения послепороговых пластин $LiNbO_3:Tb$ 2,25 мас.% и $LiNbO_3:Tb$ 2,9 мас.% присутствует линия поглощения с частотой ≈ 3466 см$^{-1}$. Значение частоты этой линии определяется величиной квазиупругой постоянной водородной связи (определяемой величиной R), близкой к единице и формированием в структуре кристалла комплексного дефекта $V_{Li}-OH$.

Таблица 1. Значения частот ν, интенсивностей I, ширин S линий в спектрах ИК-поглощения, и концентрация OH^--групп $C(OH^-)$ в послепороговых пластинах $LiNbO_3:Tb$.

Пластина	ν, см$^{-1}$	I, отн.ед.	S, см$^{-1}$	$C(OH^-)$, см$^{-3}$
$LiNbO_3:Tb$ 2,25 мас.%	3436	0,15	63,15	$8{,}81\cdot10^{18}$
	3466	0,05	42,43	
	3494	0,10	45,52	
	3523	0,06	57,14	
	3569	0,12	94,48	
$LiNbO_3:Tb$ 2,9 мас.%	3434	0,10	60,37	$5{,}196\cdot10^{18}$
	3465	0,04	42,75	
	3496	0,08	46,85	
	3524	0,05	59,88	
	3570	0,09	92,40	

Во вторую группу в спектре ИК-поглощения пластин $LiNbO_3:Tb$ 2,25 мас.% и $LiNbO_3:Tb$ 2,9 мас.% входят линии поглощения с частотами 3490-3600 см$^{-1}$, присутствие которых обусловлено изменением особенностей (механизма) вхождения легирующей примеси Tb^{3+} в структуру кристалла $LiNbO_3$. Согласно данным [12], в спектре ИК-поглощения кристалла двойного легирования $LiNbO_3:Mn:Tb$ присутствует линия поглощения с частотой 3492,4 см$^{-1}$. В нашем случае в спектре ИК-поглощения послепороговых пластин $LiNbO_3:Tb$ 2,25 мас.% и $LiNbO_3:Tb$ 2,9 мас.% присутствует линия с частотой ≈3494 см$^{-1}$. Эта линия, согласно

данным работы [13], может быть отнесена к валентным колебаниям атомов водорода в комплексном дефекте $5(Tb_{Li}^{2+})$-$2(V_{Nb}^{5-})$-OH или же в комплексном дефекте (Tb_{Li}^{2+})-$2(V_{Li}^{-})$-OH. Легирующая примесь Tb^{3+} в кристалле $LiNbO_3:Tb$ 2,25 мас.% занимает основные позиции иона Li^+. Так же в этом кристалле присутствует большее количество точечных дефектных центров (V_{Nb}^{5-}), по сравнению с кристаллом $LiNbO_3:Tb$ 2,9 мас.% [5]. Таким образом, мы предполагаем формирование в структуре послепороговых пластин $LiNbO_3:Tb$ комплексных дефектов вида $5(Tb_{Li}^{2+})$-$2(V_{Nb}^{5-})$-OH, которым соответствует полоса поглощения с частотой ≈ 3494 см$^{-1}$. Согласно данным работы [5], с ростом концентрации ионов тербия в кристалле $LiNbO_3$ уменьшается количество дефектных центров Tb_{Li}, (ион тербия в позиции иона лития идеальной структуры) по причине того, что тербий начинает занимать вакантные октаэдры. Это вызывает локальную деформацию кристаллической решётки, что проявляется в спектре ИК-поглощения пластины $LiNbO_3:Tb$ 2,9 мас.% в смещении линии поглощения, соответствующей валентному колебанию атомов водорода в комплексном дефекте $5(Tb_{Li}^{2+})$-$2(V_{Nb}^{5-})$-OH к 3500 см$^{-1}$ (см. рис. 1 и Таблицу 1).

Используя метод Клавира [9] и спектры, приведенные на рис. 1, нами был выполнен расчёт объёмной концентрации OH^--групп в пластинах $LiNbO_3:Tb$ 2,25 мас.% и $LiNbO_3:Tb$ 2,9 мас.% (см. данные Таблицы 1). Так как исследованные монокристаллические пластины имели разную толщину (L = 2,27; 1,55 мм), то результаты расчёта концентрации OH^--групп были нормированы на толщину образцов. Согласно расчёту, максимальное значение концентрации OH^--групп характерно для пластины $LiNbO_3:Tb$ 2,25 мас.% за счёт формирования двух комплексных дефектов: V_{Li}-OH и $5(Tb_{Li}^{2+})$-$2(V_{Nb}^{5-})$-OH.

4. Заключение

ИК-спектры поглощения послепороговых пластин (2,25 мас.% и 2,9 мас.%) в диапазоне 3000–4000 см$^{-1}$ имеют сложную структуру, состоящую из нескольких перекрывающихся линий. Это обусловлено не только валентными колебаниями OH^--групп, но и наложением слабых электронных $f-f$ переходов тербия, которые становятся разрешенными под влиянием кристаллического поля. Полосы поглощения в диапазоне 3490-3600 см$^{-1}$ связаны с механизмом вхождения тербия в кристаллическую решетку кристалла $LiNbO_3:Tb$. В кристалле $LiNbO_3:Tb$ 2,25 мас.% тэрбий преимущественно занимает основные позиции лития. С ростом содержания легирующей примеси в кристалле $LiNbO_3:Tb$ 2,9 мас.% тэрбий занимает вакантные октаэдрические позиции (вместо основных

литиевых позиций). Обнаружено увеличение объемной концентрации OH^--групп в кристалле $LiNbO_3:Tb$ 2,25 мас.% относительно кристалла $LiNbO_3:Tb$ 2,9 мас.%. Это связано в большей степени с изменением стехиометрии в кристалле $LiNbO_3:Tb$ 2,25 мас.% и одновременным формированием в дефектной структуре кристалла двух видов комплексных дефектов: $V_{Li}-OH$ и $5(Tb_{Li}^{2+})$-$2(V_{Nb}^{5-})$-OH .

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, тема FMEZ-2025-0055.

Библиографический список:

1. **Jüstel, T.** New developments in the field of luminescent materials for lighting and displays / T. Jüstel, H. Nikol, C. Ronda // Angewandte Chemie International Edition. – 1998. – V. 37. – I. 22. – P. 3084-3103. DOI: 10.1002/(SICI)1521-3773(19981204)37:22<3084::AID-ANIE3084>3.0.CO;2-W.
2. **Lyu, T.** Designing $LiTaO_3$:Ln^{3+}, Eu^{3+} (Ln = Tb or Pr) perovskite dosimeter with excellent charge carrier storage capacity and stability for anti-counterfeiting and flexible X-ray imaging / T. Lyu, P. Dorenbos, Z. Wei // Chemical Engineering Journal. – 2023. – V. 461. – Art. № 141685. – 15 p. DOI: 10.1016/j.cej.2023.141685.
3. **Lisiecki, R**. Effect of temperature on luminescence of $LiNbO_3$ crystals single-doped with Sm^{3+}, Tb^{3+}, or Dy^{3+} ions / R. Lisiecki, B. Macalik, R. Kowalski et al. // Crystals. – 2020. – V. 10. – I. 11. – Art. № 1034. – 15 p. DOI: 10.3390/cryst10111034.
4. **Long, S.** Manometry strategy based on excitation spectral shift induced by pressure-controlled intervalence charge transfer in Tb^{3+}:$LiTaO_3$ / S. Long, Z. Liu, B. Wang. // Ceramics International. – 2025. – V. 51. – I. 13. – P. 17912-17918. DOI: 10.1016/j.ceramint.2025.01.563.
5. **Palatnikov, M.** Growth and concentration dependences of properties of $LiNbO_3$:Tb crystals grown in a single technological cycle / M. Palatnikov, N. Sidorov, A. Kadetova et al. // Optical Materials. – 2021. – V. 122. – Part A. – Art. № 111755. – 9 p. DOI: 10.1016/j.optmat.2021.111755.
6. **Палатников, М.Н.** Дефектная структура кристаллов ниобата лития одинарного и двойного легирования / М.Н. Палатников, Н.В. Сидоров, О.В. Палатникова, И.В. Бирюкова. – М.: Российская академия наук, 2024. –332 с.
7. **Slautin, B.N.** Submicron periodical poling in Z-cut lithium niobate thin films / B.N. Slautin, H. Zhu, V.Ya. Shur // Ferroelectrics. – 2021. – V. 576. – I. 1. – P. 119-128. DOI: 10.1080/00150193.2021.1888270.
8. **Savelyev, E**. Kinetics of the domain structure in uniform electric field in $LiNbO_3$ with surface layer modified by soft proton exchange / E. Savelyev, A. Akhmatkhanov, H. Tronche et al. // Physica status solidi (RRL) – Rapid Research Letters. – 2024. – V. 18. – I. 4. – Art. № 2300420. – 6 p. DOI: 10.1002/pssr.202300420
9. **Klauer, S**. Influence of the H-D isotopic substitution on the protonic conductivity in $LiNbO_3$ crystal / S. Klauer, M. Wöhlecke, S. Kapphan // Physical Review B. – 1992. – V. 45. – I. 6. – P. 2786-2799. DOI: 10.1103/physrevb.45.2786.
10. **Lengyel, K.** Growth, defect structure, and THz application of stoichiometric lithium niobate / K. Lengyel, Á. Péter, L. Kovács et al. // Applied Physics Reviews. – 2015. – V. 2. – I. 4. – P. 040601-1-040601-28. DOI: 10.1063/1.4929917.
11. **Cabrera, J.M.** Hydrogen in lithium niobate / J.M. Cabrera, J. Olivares, M. Carrascosa et al. // Advances in Physics. – 1996. – V. 45. – I. 5. – P. 349-392. DOI: 10.1080/00018739600101517.
12. **Lee, S.M**. Characteristic investigations of stoichiometric $LiNbO_3$ single crystal fiber co-doped with Tb and Mn / S.M. Lee, J.W. Shur, T.I. Shin et al. // Materials Science Forum. – 2004. – V. 449-452. – P. 985-988. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.449-452.985.
13. **García Solé, J.** Rare earth and transition metal ion centers in $LiNbO_3$ / J. García Solé, L. E. Bausá, D. Jaque et al. // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – 1998. – V. 54. – I. 11. – P. 1571-1581. DOI: 10.1016/s1386-1425(98)00084.

References:

1. Jüstel T., Nikol H., Ronda C. New developments in the field of luminescent materials for lighting and displays, *Angewandte Chemie International Edition*, 1998, vol. 37, issue 22, pp. 3084-3103. DOI:

10.1002/(SICI)1521-3773(19981204)37:22<3084::AID-ANIE3084>3.0.CO;2-W.
2. Lyu T., Dorenbos P., Wei Z. Designing $LiTaO_3$:Ln^{3+}, Eu^{3+} (Ln = Tb or Pr) perovskite dosimeter with excellent charge carrier storage capacity and stability for anti-counterfeiting and flexible X-ray imaging, *Chemical Engineering Journal*, 2023, vol. 461, art. no. 141685, 15 p. DOI: 10.1016/j.cej.2023.141685.
3. Lisiecki R., Macalik B., Kowalski R. et al. Effect of temperature on luminescence of $LiNbO_3$ crystals single-doped with Sm^{3+}, Tb^{3+}, or Dy^{3+} ions, *Crystal*s, 2020, vol. 10, issue. 11, art. no. 1034, 15 p. DOI: 10.3390/cryst10111034.
4. Long S., Liu Z., Wang B. Manometry strategy based on excitation spectral shift induced by pressure-controlled intervalence charge transfer in Tb^{3+}:$LiTaO_3$, *Ceramics International*, 2025, vol. 51, issue 13, pp. 17912-17918. DOI: 10.1016/j.ceramint.2025.01.563.
5. Palatnikov M., Sidorov N., Kadetova A. et al. Growth and concentration dependences of properties of $LiNbO_3$:Tb crystals grown in a single technological cycle, *Optical Materials*, 2021, vol. 122, part A, art. no. 111755, 9 p. DOI: 10.1016/j.optmat.2021.111755.
6. Palatnikov M.N., Sidorov N.V., Palatnikova O.V., Biryukova I.V. *Defektnaja struktura kristallov niobata litija odinarnogo i dvojnogo legirovanija* [Defect structure of single and double doped lithium niobate crystals]. Moscow, RAS, Publ., 2024, 332 p. (In Russian).
7. Slautin B. N., Zhu H., Shur V.Ya. Submicron periodical poling in Z-cut lithium niobate thin films, *Ferroelectrics*, 2021, vol. 576, issue 1, pp. 119-128. DOI: 10.1080/00150193.2021.1888270.
8. Savelyev E., Akhmatkhanov A., Tronche H. et al. Kinetics of the domain structure in uniform electric field in $LiNbO_3$ with surface layer modified by soft proton exchange, *Physica status solidi (RRL)–Rapid Research Letters*, 2024, vol. 18, issue 4, art. no. 2300420, 6 p. DOI: 10.1002/pssr.202300420.
9. Klauer S., Wöhlecke M., Kapphan S. Influence of the H-D isotopic substitution on the protonic conductivity in *$LiNbO_3$* crystal, *Physical Review B,* 1992, vol. 45, issue 6, pp. 2786-2799. DOI: 10.1103/physrevb.45.2786.
10. Lengyel K., Péter Á., Kovács L. et al. Growth, defect structure, and THz application of stoichiometric lithium niobate, *Applied Physics Reviews*, 2015, vol. 2, issue 4, pp. 040601-1-040601-28. DOI: 10.1063/1.4929917.
11. Cabrera J.M., Olivares J., Carrascosa M. et al. Hydrogen in lithium niobate, *Advances in Physics*, 1996, vol. 45, issue 5, pp. 349-392. DOI: 10.1080/00018739600101517.
12. Lee S.M., Shur J.W., Shin T I. et al. Characteristic investigations of stoichiometric $LiNbO_3$ single crystal fiber co-doped with Tb and Mn, *Materials Science Forum*, 2004, vol. 449-452, pp. 985-988. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.449-452.985.
13. García Solé J., Bausá L. E., Jaque D. et al. Rare earth and transition metal ion centers in $LiNbO_3$, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 1998, vol. 54, issue 11, pp. 1571-1581. DOI: 10.1016/s1386-1425(98)00084.