УДК 34.882.4.536.361 *Оригинальная статья*

Влияние способа легирования на оптические свойства монокристаллов $LiNbO_3$:Y

Н.А. Теплякова, С.М. Маслобоева, И.В. Бирюкова
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 обл., Апатиты, Академгородок, 26а
n.tepliakova@ksc.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.155

Аннотация: С использованием разных способов легирования (гомогенного и твердофазного) методом Чохральского выращены кристаллы $LiNbO_3$:*Y* с концентрацией иттрия 0,46 мас.%. Определены оптимальные технологические условия выращивания кристаллов $LiNbO_3$:*Y*, включающие как непосредственно ростовые параметры, так и условия подготовки расплава. Изучены оптические и фоторефрактивные свойства полученных монокристаллов $LiNbO_3$:*Y* методами лазерной коноскопии и фотоиндуцированного рассеяния света. Сравнительный анализ двух кристаллов $LiNbO_3$:*Y* показал существенное различие их оптических свойств. В кристалле $LiNbO_3$:*Y*, выращенном из шихты гомогенного легирования, фоторефрактивный эффект отсутствует, а в кристалле $LiNbO_3$:*Y*, выращенном из шихты твердофазного легирования, присутствует фоторефрактивный отклик, причем наблюдается практически мгновенное раскрытие индикатрисы фотоиндуцированного рассеяния света. Кроме того кристалл $LiNbO_3$:*Y* гомогенного легирования имеет существенно более высокую оптическую однородность по сравнению с кристаллом $LiNbO_3$:*Y* твердофазного легирования. Полученные результаты свидетельствуют, что разработанная технологическая схема получения монофазной шихты ниобата лития, легированной иттрием, методом гомогенного легирования создает условия для роста оптически и композиционно однородных монокристаллов $LiNbO_3$:*Y*, перспективных для использования в электронной технике как нелинейно-оптического материала с низким эффектом фоторефракции.

Ключевые слова: ниобат лития, монокристалл, шихта, гомогенное и прямое легирование, лазерная коноскопия, фотоиндуцированное рассеяние света.

Теплякова Наталья Александровна – к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник сектора колебательной спектроскопии 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»
Маслобоева Софья Михайловна – к.т.н., ведущий научный сотрудник 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»
Бирюкова Ирина Викторовна – к.т.н., ведущий научный сотрудник 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»

Original paper

Influence of the doping method on optical properties of $LiNbO_3$:Y single crystals

N.A. Teplyakova, S.M. Masloboeva, I.V. Biryukova
Tananaev Institute of Chemistry – Subdivision of the Federal Research Centre «Kola Science Centre of the RAS», Apatity, Russia
n.tepliakova@ksc.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.155

Abstract: Using different doping methods (homogeneous and solid-phase) and the Czochralski method, $LiNbO_3$:*Y* crystals with an yttrium concentration of 0,46 wt.% were grown. Optimal technological conditions for growing $LiNbO_3$:*Y* crystals have been determined, including both the

© Н.А. Теплякова, С.М. Маслобоева, И.В. Бирюкова, 2026

growth parameters and the melt preparation conditions. The optical and photorefractive properties of the obtained $LiNbO_3$:Y single crystals have been studied using laser conoscopy and photoinduced light scattering methods. Comparative analysis of two $LiNbO_3$:Y crystals showed a significant difference in their optical properties. In the $LiNbO_3$:Y crystal grown from the homogeneous doping charge, the photorefractive effect is absent; in the $LiNbO_3$:Y crystal grown from the solid-phase doping charge, a photorefractive response is present, and an almost instantaneous opening of the photoinduced light scattering indicatrix is observed. In addition, the homogeneously doped $LiNbO_3$:Y crystal has a significantly higher optical homogeneity compared to the solid-phase doped $LiNbO_3$:Y crystal. The obtained results indicate that the developed process flowsheet for producing a single-phase lithium niobate charge doped with yttrium using homogeneous doping creates conditions for the growth of the optical and compositional uniformity of $LiNbO_3$:Y single crystals. These crystals are promising for use in electronics as a nonlinear optical material with low photorefractive properties.

Keywords: lithium niobate, single crystal, charge, homogeneous and direct doping, laser conoscopy, photoinduced light scattering.

Natalya A. Teplyakova – Ph. D., Leading 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»
Sofia M. Masloboeva – Ph. D., Leading Researcher, Electronic Engineering Materials Laboratory, Tananaev Institute of Chemistry – Subdivision of the Federal Research Centre «Kola Science Centre of the RAS»
Irina V. Biryukova – Ph. D., Leading Researcher, Electronic Engineering Materials Laboratory, Tananaev Institute of Chemistry – Subdivision of the Federal Research Centre «Kola Science Centre of the RAS»

Поступила в редакцию/received: 17.07.2026; после рецензирования/revised: 15.08.2026; принята/accepted: 19.08.2026.

1. Введение

В настоящее время для разработки функциональных оптических элементов различного назначения все большее внимание к себе привлекают легированные кристаллы ниобата лития $LiNbO_3$. Легирование кристаллов $LiNbO_3$ переходными элементами (например, Y, Fe и др.), благодаря сильным электронно-фононным взаимодействиям ионов, делает кристаллы $LiNbO_3$ перспективными для разработки материалов для лазерно-активных сред перестраиваемых и фемтосекундных лазеров ближнего ИК-диапазона у которых ширина полосы усиления является определяющим параметром [1]. Легированные иттрием кристаллы разного состава широко применяются в качестве функциональных материалов различного назначения: сцинтилляторы [2-4], высокоэффективные катализаторы [5], износостойкие электроды [6], газовые датчики [7]. Редкоземельный элемент иттрий прекрасно подходит для создания различных нелинейно-оптических и лазерных материалов в качестве элемента основной матрицы и активатора [8, 9], в том числе, в качестве активатора в матрице кристалла $LiNbO_3$, обладающего очень высокими значениями нелинейно-оптических коэффициентов и высокой лучевой стойкостью [9]. Кристаллы $LiNbO_3$, легированные иттрием, являются также перспективными материалами для нелинейно-оптического преобразования

лазерного излучения [10], генерации ТГц-излучения [11], записи отражательных решёток [12] и др.

При выращивании легированных кристаллов ниобата лития обычно применяют метод прямого твердофазного легирования, суть которого заключается в твердофазном синтезе смеси пентаоксида ниобия, карбоната лития и оксида легирующего элемента [13]. Основным недостатком метода твердофазного легирования являются возможность появления полос роста и частичного растрескивания кристаллов $LiNbO_3$ из-за возникающих послеростовых термических напряжений. Наличие дефектности и неоднородности ведет к отбраковке отдельных участков кристаллов при изготовлении из них элементов для оптических устройств.

2. Постановка задачи и обсуждение результатов

В данной работе представлена технологическая схема получения монофазной шихты ниобата лития, легированной иттрием, методом гомогенного легирования, приведены исследования кристаллов $LiNbO_3:Y$, выращенных с использованием разных методов легирования методами лазерной коноскопии и фотоиндуцированного рассеяния света (ФИРС).

Была разработана следующая технологическая схема получения шихты ниобата лития $LiNbO_3:Y$ гомогенного легирования. При гомогенном легировании легирующий элемент Y вводят непосредственно в ниобиевый реэкстракт. Полученный при этом $Nb_2O_5:Y$, используется как прекурсор при синтезе шихты ниобата лития, из которой был выращен затем кристалл $LiNbO_3:Y$ гомогенного легирования. Из высокочистого Nb-содержащего фторидного раствора, имеющего состав, г/л: Nb_2O_5 – 140,75, F^- – 105,65, 25%-ным раствором NH_4OH осаждали гидроксид ниобия до pH ~ 8-9. Осадок отфильтровывали на нутч-фильтре и далее репульпацией трехкратно промывали деионизированной водой от ионов аммония и фтора при соотношении твердой и жидкой фаз Т:Ж = 1:3. Подсушенный до влажности 60-70% при 90°С высокочистый гидроксид ниобия смешивали при Т:Ж = 1:2 с раствором $Y(NO_3)_3$. Концентрацию Y в $Y(NO_3)_3$ рассчитывали исходя из заданного его содержания в шихте $LiNbO_3:Y$. Смесь перемешивали в течение 3 ч и отфильтровывали. Осадок промывали деионизированной водой при Т:Ж = 1:2, фильтровали, сушили при 140°С, а затем прокаливали при 1000°С в течение 3 ч. В ходе проведенных операций получали гомогенно легированный прекурсор $Nb_2O_5:Y$.

Содержание иттрия в прекурсоре $Nb_2O_5:Y$ и шихте $LiNbO_3:Y$ определяли методом рентгенофлуоресцентной спектрометрии на приборе Спектроскан МАКС-GV. Анализ экспериментальных данных показал, что

легирующая примесь Y в пределах допустимых погрешностей метода анализа практически полностью переходит в прекурсор $Nb_2O_5:Y$, в котором концентрация иттрия составила 0,491 мас.%. По содержанию катионных примесей (Mo, Zr, Al, Ti, Co $<5\times10^{-4}$; Fe $<3\times10^{-4}$; Mn, Ni, Cu, V $<2\times10^{-4}$; Cr, Pb, Sn $<3\times10^{-4}$; Ca, Si $<1\times10^{-3}$ мас.%), определенных методом спектрального анализа, прекурсор может быть использован для получения шихты ниобата лития $LiNbO_3:Y$. Результаты РФА свидетельствуют, что прекурсор $Nb_2O_5:Y$ является однофазным [14].

Шихта $LiNbO_3:Y$ содержала 0,450 мас.% Y. Содержание фтора как в прекурсоре, так и в шихте было $<1\times10^{-3}$ мас.%. Шихта $LiNbO_3:Y$ по результатам РФА была однофазной и соответствовала $LiNbO_3$ [15]. Исходя из данных химического анализа, она содержала 62,09 мас.% Nb и 4,35 мас.% Li, что соответствует заданному конгруэнтному составу. По концентрации катионных примесей (Pb, Ni, Cr, Co, V, Ti, Fe, Al $<2\times10^{-4}$; Ca, Si $<1\times10^{-3}$; Ta $<1\times10^{-2}$ мас.%) шихта $LiNbO_3:Y$ может быть использована для выращивания монокристаллов методом Чохральского.

Выращивание обоих кристаллов $LiNbO_3:Y$ гомогенного и твердофазного легирования проводили на ростовой установке Кристалл-2 индукционного типа, оснащенной тиристорным генератором, на воздухе. Масса полной загрузки тигля составляла 1800 г. Конструкция теплового узла обеспечивала малый осевой градиент (1 град/мм) на границе раздела фаз. Выращивание монокристалла проводили на малой скорости роста (0,79 мм/ч), что обеспечивало исключение концентрационного переохлаждения на протяжении всего процесса. Скорость вращения (8,2 об/мин) была выбрана экспериментально, исходя из условий плоского морфологически устойчивого фронта кристаллизации. Для достижения максимально однородной структуры легированного расплава во всем объеме тигля перед затравливанием производилась выдержка в течение 15 ч при температуре, превышающей на 200°С температуру получения расплава. Это способствовало разрушению ассоциативных связей и обеспечивало наиболее полную гомогенизацию расплава. Отрыв кристалла от расплава производился медленно, без изменения скорости вытягивания и вращения, при плавном повышении мощности ВЧ-нагревателя вплоть до самопроизвольного отрыва кристалла. После отрыва кристалл поднимали в режиме быстрого перемещения вверх на 10 мм от расплава и после 5-часовой выдержки при температуре отрыва производили охлаждение в автоматическом режиме со скоростью 100 град/ч до момента отключения генератора ростовой установки. Съем кристалла производили через 20 ч после полного охлаждения теплового узла до комнатной температуры.

С целью дополнительного снятия термоупругих напряжений

кристалл подвергали термической обработке при 1240°С в течение 24 ч в высокотемпературной отжиговой установке «Лантан». Скорость нагрева и охлаждения составляла 50 град/ч. В монодоменное состояние кристаллы переводили посредством проведения высокотемпературного электродиффузионного отжига в установке «Лантан» при охлаждении со скоростью 15 град/ч в температурном интервале от 1235°С до 830°С под постоянным электрическим полем.

Схема экспериментальной установки для исследований ФИРС подробно описана в [16]. ФИРС возбуждалось лазером $Nd:YAG$ (MLL-100) (λ_o= 532 нм, p ~6,3 Вт/см^2). В условиях нашего эксперимента наблюдалось ФИРС ee -типа [16]. Кристалл устанавливался на пути лазерного луча. При этом волновой вектор световой волны был направлен вдоль оси Y, по нормали к входной грани кристалла, а вектор напряженности ее электрического поля **E** параллелен оси Z, совпадающий с направлением полярной оси кристалла и, соответственно, вектора спонтанной поляризации P_s. Рассеянное кристаллом излучение падало на полупрозрачный экран, размещенный за кристаллом, и регистрировалось цифровой фотокамерой. Угол рассеяния рассчитывался по формуле: $\theta = arctg(a/b)$, где a – размер индикатрисы ФИРС в положительном направлении полярной оси, b – расстояние от кристалла до экрана. Поскольку явление ФИРС является многофакторным, а форма индикатрисы рассеянного излучения может быть различной и многослойной [16, 17], то за крайнюю точку на картине ФИРС, по которой определяется угол рассеяния, принимали точку, в которой интенсивность рассеянного излучения падает на порядок. Для оценки степени асимметрии индикатрисы ФИРС применен введенный в работе [16] параметр $\gamma = \theta/b$, где θ – максимальный угол рассеянного излучения в положительном направлении полярной оси кристалла; b – максимальный угол рассеянного излучения в отрицательном направлении полярной оси кристалла.

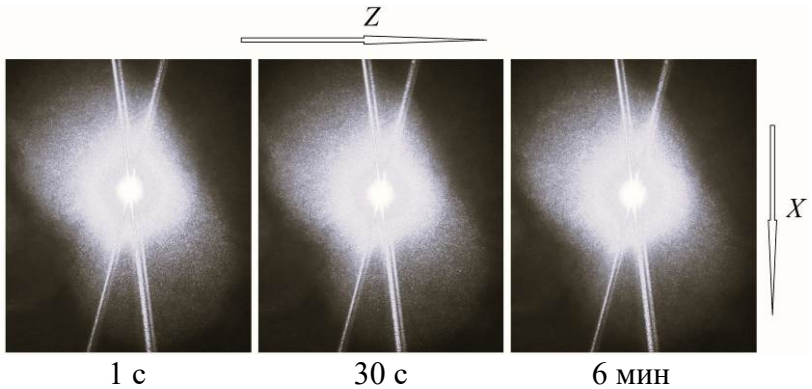
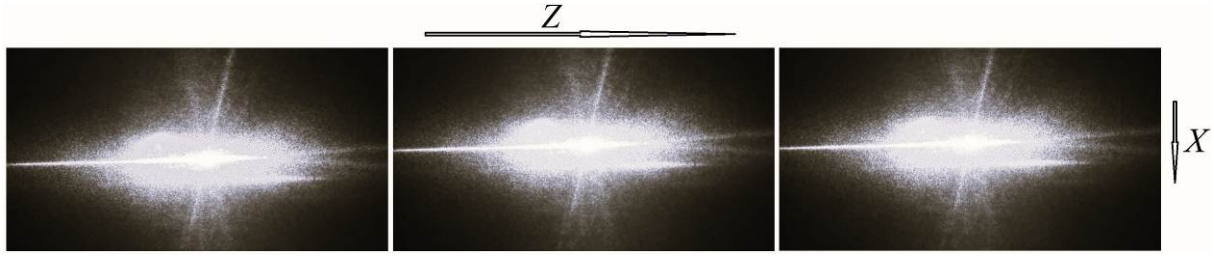


Рис. 1. Картины ФИРС кристалла $LiNbO_3:Y$ (гомогенный).

На рис. 1, 2 представлены временные зависимости картин ФИРС кристаллов: $LiNbO_3:Y$ (гомогенный) и $LiNbO_3:Y$ (твердофазный). Из рис. 1 видно, что для исследованного кристалла $LiNbO_3:Y$ (гомогенный) даже после облучения в течение 6 мин лазерным излучением мощностью 160 мВт, фоторефрактивный отклик отсутствует, индикатриса ФИРС не раскрывается, картины ФИРС с течением времени не меняются. Для кристалла $LiNbO_3:Y$ (твердофазный) (см. рис. 2), наблюдается раскрытие картины ФИРС вдоль полярной оси в виде восьмерки, что указывает на наличие фоторефрактивного отклика данного кристалла. Причем раскрытие индикатрисы ФИРС наблюдается в первые 30 сек лазерного облучения (см. рис. 2). Угол рассеяния θ составил 34°, параметр асимметрии индикатрисы ФИРС γ = 1,26.



1 с 30 с 6 мин

Рис. 2. Картины ФИРС кристалла $LiNbO_3:Y$ (твердофазный).

Для получения коноскопических картин больших размеров применялся метод лазерной коноскопии [16]. Использовалось излучение лазера MLL-100 ($\lambda = 532$ нм), $P = 1$ и 90 мВт. При проведении коноскопического эксперимента кристаллический образец устанавливался на подвижной двухкоординатной оптической подставке, что позволяло просканировать всю плоскость входной грани лазерным лучом и получить множество коноскопических картин, соответствующих различным участкам поперечного сечения исследуемого образца.

На рис. 3 (1)-(4) представлены коноскопические картины пластин кристалла $LiNbO_3:Y$ (твердофазный), при сканировании по плоскости входной грани.

На коноскопических картинах (см. рис. 3, (2), (4)) присутствуют признаки аномальной оптической двуосности, при которой имеет место деформация оптической индикатрисы кристалла в направлении, соответствующем направлению сдвига частей «мальтийского креста». При этом наблюдается разрыв «мальтийского креста» на две части. Изохромы вытягиваются в направлении смещения фрагментов креста и приобретают вид эллипсов. На коноскопических картинах на рис. 3 (1), (3) наблюдается просветление в центре «мальтийского креста» без его разрыва, изохромы

сохраняют круговую симметрию. Появление на коноскопических картинах признаков аномальной оптической двуосности связано с наличием в структуре кристалла локальных областей с пониженной симметрией, возможно вследствие неравномерного вхождения примеси.

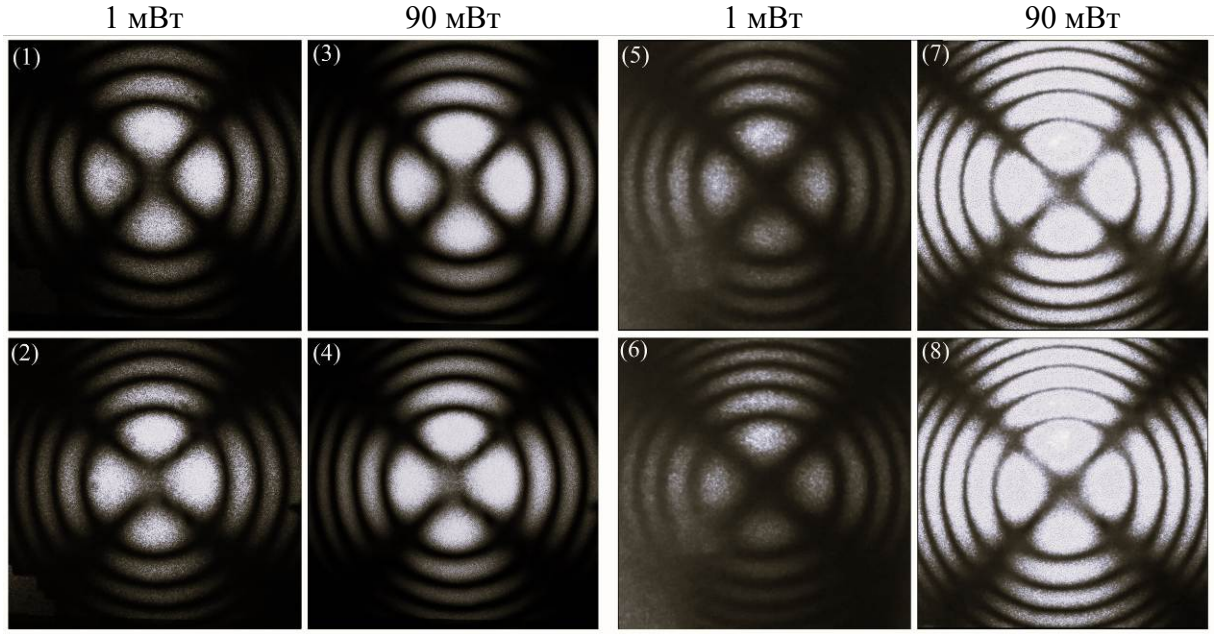


Рис. 3. Коноскопические картины кристалла $LiNbO_3:Y$ (1)-(4) твердофазный; (5)-(8) гомогенный.

На рис. 3 (5)-(8) представлены коноскопические картины кристалла $LiNbO_3:Y$ (гомогенный). Результаты лазерного сканирования по плоскости входной грани показывают высокую оптическую однородность образцов и хорошее оптическое качество. Коноскопические картины соответствуют коноскопическим картинам одноосного кристалла (см. рис. 3 (5)-(8)), имеют круговую симметрию, при которой «мальтийский крест» сохраняет целостность в центре поля зрения, а изохромы представляют собой концентрические окружности с центром в точке выхода оптической оси.

3. Заключение

Таким образом, использование метода гомогенного легирования для получения шихты ниобата лития позволяет получить оптически и композиционно однородные монокристаллы $LiNbO_3:Y$ без полос роста и других макро- и микродефектов. Выращенные монокристаллы $LiNbO_3:Y$ гомогенного легирования могут быть перспективны для использования в электронной технике в качестве нелинейно-оптического материала с низким эффектом фоторефракции.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (регистрационный номер FMEZ-2025-0055).

Библиографический список:

1. **Сидоров, Н.В.** Монокристаллы ниобата и танталата лития разного состава и генезиса / Н.В. Сидоров, М.Н. Палатников, Н.А. Теплякова, и др. – М.: РАН, 2022. – 288 с.
2. **Zapadlík, O.** GSAG:Ce scintillator: insights from yttrium admixture / O. Zapadlík, J. Pejchal, V. Babin et al. // RSC Advances. 2025. – V. 15. – I. 3. – P. 2140-2151. DOI: 10.1039/D4RA07622B.
3. **Ермоченков, И.М.** Сцинтилляционный кристалл $Lu_2SiO_{5-z}:Y^{3+}:Ce^{3+}:Ca^{2+}$ для позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) / И.М. Ермоченков, Ю.Д. Заварцев, А.И. Загуменный и др. // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2024. – Вып. 2. – С. 39-46.
4. **Белов, М.В.** Сцинтилляционные свойства крупных кристаллов $Lu_2SiO_{5-z}:Y^{3+}:Ce^{3+}:Ca^{2+}$ / М.В. Белов, Ю.Д. Заварцев, М.В. Завертяев и др. // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2022. – Вып. 5. – С. 3-9.
5. **Wang, T.** Effect of yttrium doping on the properties of Nickel-Iron multiphase heterostructures at high current conditions / T. Wang, Y. Wang, Y. Weng et al. // Chemical Engineering Science. – 2025. – V. 302. – Part A. – Art. № 120859. – 10 p. DOI: 10.1016/j.ces.2024.120859.
6. **Jiang, Y.** A high rate and stability O_3-type cathode material based on a Y-doped $NaNi_{1/3}Fe_{1/3}Mn_{1/3}O_2$ matrix / Y. Jiang, L. Zhu, J. Tian et al. // Materials Today Communications. – 2025. – V. 46. – Art. № 112523. – 12 p. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2025.112523.
7. **Luo, Q.** Excellent-performing gas sensor based on Yttrium-doped $ZnFe_2O_4$ nanofibers for detection of n-Butanol / Q. Luo, Y. Wan, Z. Wang et al. // Journal of Alloys and Compounds. 2025. – V. 1027. – Art. № 180605. – 12 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.180605.
8. **Ватник, С.М.** Мультиваттная генерация лазерных керамик, содержащих 0.8% и 1% Nd:YAG / С.М. Ватник, В.В. Осипов, К.Е. Лукьяшин и др. // Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44. – № 6. – С. 585-587.
9. **Kaminskii, A.A.** Laser crystals and ceramics: recent advances / A.A. Kaminskii // Laser & Photonics Reviews. 2007. – V. 1. – I. 2. – P. 93-177. DOI: 10.1002/lpor.200710008.
10. **Goul'Kov, M.** Degenerate parametric light scattering in periodically poled $LiNbO_3$:Y:Fe / M. Goul'Kov, S. Odoulov, I. Naumova et al. // Physical Review Letters. 2001. – V. 86. – I. 18. – P. 4021-4024. DOI: 10.1103/PhysRevLett.86.4021.
11. **Kornienko, V.V.** Towards terahertz detection and calibration through spontaneous parametric down-conversion in the terahertz idler-frequency range generated by a 795 nm diode laser system / V.V. Kornienko, G.Kh. Kitaeva, F. Sedlmeir et al. // APL Photonics. – 2018. – V. 3. – I. 5. – P. 051704-1-051704-8. DOI: 10.1063/1.5011201.
12. **Odoulov, S.** Reflection hologram recording in periodically poled $LiNbO_3$:Y:Fe / S. Odoulov, A. Shumelyuk, R. Thien et al. // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. – 2004. – V. 6. – I. 2. – P. 224-228. DOI: 10.1088/1464-4258/6/2/012.
13. **Палатников, М.Н.** Технология управляемого синтеза монокристаллических и керамических материалов на основе ниобатов-танталатов щелочных металлов / М.Н. Палатников, Н.В. Сидоров, В.Т. Калинников // Цветные металлы. – 2000. – № 10. – С. 54-59.
14. **Kato, K.** Structure refinement of H-Nb_2O_5 / K. Kato // Acta Crystallographica Section B. – 1976. – V. 32. – I. 3. – P. 764-767. DOI: 10.1107/S0567740876003944.
15. **Hsu, R.** Synchrotron X-ray studies of $LiNbO_3$ and $LiTaO_3$ / R. Hsu, E.N. Maslen, D. Boulay et al. // Acta Crystallographica Section B. – 1997. – V. 53. – I. 3. – P. 420-428. DOI: 10.1107/S010876819600777X.
16. **Сидоров, Н.В.** Лазерная коноскопия и фотоиндуцированное рассеяние света в исследованиях свойств нелинейно-оптического кристаллы ниобата лития / Н.В. Сидоров, О.Ю. Пикуль, Н.А. Теплякова и др. – М.: РАН, 2019. – 350 с.
17. **Теплякова, Н.А.** Особенности дефектной структуры монокристалла $LiNbO_3$:Cu(0.015 мас. %) / Н.А. Теплякова, Н.В. Сидоров, М.Н. Палатников // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2023. – Вып. 15. – С. 215-222. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.215.

References:

1. Sidorov N.V., Palatnikov M.N., Teplyakova N.A. et al. *Monokristally niobata I tantalata litiya raznogo sostava I genezisa* [Monocrystals of lithium niobate and tantalate of different composition and genesis]. Moscow, RAS Publ., 2022, 288 p. (In Russian).
2. Zapadlík O., Pejchal J., Babin V. et al. GSAG:Ce scintillator: insights from yttrium admixture, *RSC Advances*,

2025, vol. 15, issue 3, pp. 2140-2151, DOI: 10.1039/D4RA07622B.
3. Ermochenkov I.M., Zavartsev Yu.D., Zagumennyi A.I. et al. Scintillation $Lu_2SiO_{5-Z}:Y^{3+}:Ce^{3+}:Ca^{2+}$ crystal for positron emission tomography, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2024, vol. 51, issue 1, pp. 25-29. DOI: 10.3103/S1068335623601231.
4. Belov M.V., Zavartsev Yu.D., Zavertyaev M.V. et al. Scintillation properties of large $Lu_2SiO_{5-Z}:Y^{3+}:Ce^{3+}:Ca^{2+}$ crystals, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2022, vol. 49, issue 5, pp. 121-124, DOI: 10.3103/S1068335622050049.
5. Wang T., Wang Y., Weng Y. et al. Effect of yttrium doping on the properties of Nickel-Iron multiphase heterostructures at high current conditions, *Chemical Engineering Science*, 2025, vol. 302, part A, art.no. 120859, 10 p. DOI: 10.1016/j.ces.2024.120859.
6. Jiang Y., Zhu L., Tian J., et al. A high rate and stability O_3-type cathode material based on a Y-doped $NaNi_{1/3}Fe_{1/3}Mn_{1/3}O_2$ matrix, *Materials Today Communications*, 2025, vol. 46, art. no. 112523, 12 p. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2025.112523.
7. Luo Q., Wan Y., Wang Z., et al. Excellent-performing gas sensor based on Yttrium-doped $ZnFe_2O_4$ nanofibers for detection of n-Butanol, *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, vol. 1027, art. no. 180605, 12 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.180605.
8. Vatnik S.M., Osipov V.V., Luk'yashin K.E.,= et al. Multiwatt lasing of Nd:YAG laser ceramics containing 0.8 % and 1 % of Nd, *Quantum Electronics*, 2014, vol. 44, no. 6, pp. 585-587. DOI: 10.1070/QE2014v044n06ABEH015430.
9. Kaminskii A.A. Laser crystals and ceramics: recent advances, *Laser & Photonics Reviews*, 2007, vol. 1, issue 2, pp. 93-177. DOI: 10.1002/lpor.200710008.
10. Goul'Kov M., Odoulov S., Naumova I. et al. Degenerate parametric light scattering in periodically poled $LiNbO_3$:Y:Fe, *Physical Review Letters*, 2001, vol. 86, issue 18, pp. 4021-4024. DOI: 10.1103/PhysRevLett.86.4021.
11. Kornienko V.V., Kitaeva G.Kh., Sedlmeir F., et al. Towards terahertz detection and calibration through spontaneous parametric down-conversion in the terahertz idler-frequency range generated by a 795 nm diode laser system, *APL Photonics*, 2018, vol. 3, issue 5, pp051704-1-051704-8. DOI: 10.1063/1.5011201.
12. Odoulov S., Shumelyuk A., Thien R. et al. Reflection hologram recording in periodically poled $LiNbO_3$:Y:Fe, *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2004, vol. 6, no. 2, pp. 224-228. DOI: 10.1088/1464-4258/6/2/012.
13. Palatnikov M.N., Sidorov N.V., Kalinnikov V.T. Tehnologiya upravlyaemogo sinteza monokristallicheskikh i keramicheskikh materialov na osnove niobatov-tantalatov shchelochnykh metallov [The technology of controlled synthesis of single crystal and ceramic materials on the basis of alkali metal niobates-tantalates], *Czvetnye metally [Non-ferrous metals]*, 2000, no. 10, pp. 54-59. (In Russian).
14. Kato K. Structure refinement of H-Nb_2O_5, *Acta Crystallographica Section B*, 1976, vol. 32, issue 3, pp. 764-767. DOI: 10.1107/S0567740876003944.
15. Hsu R., Maslen E.N., Boulay D. et al. Synchrotron X-ray studies of $LiNbO_3$ and $LiTaO_3$, *Acta Crystallographica Section B*, 1997, vol. 53, issue 3, pp. 420-428. DOI: 10.1107/S010876819600777X.
16. Sidorov N.V., Pikoul O.Y., Teplyakova N.A., et al. *Lazernaya konoskopiya i fotoinducirovannoe rasseyanie sveta v issledovaniyakh svojstv nelinejno-opticheskogo kristalla niobata litiya* [Laser conoscopy and photoinduced light scattering in research of properties of optically nonlinear lithium niobate crystal]. Moscow, RAS Publ., 2019, 350 p. (In Russian).
17. Teplyakova N.A., Sidorov N.V., Palatnikov M.N. Osobennosti defektnoj struktury monokristalla $LiNbO_3$:Cu(0.015 mas. %) [Features of the defect structure of a $LiNbO_3$:Cu (0.015 wt.%) single crystal], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov* [*Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials],* 2023, issue 15, pp. 215-222. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.215 (In Russian).