

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ДВОЙНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ $\text{LiNbO}_3:\text{Gd}:\text{Mg}$

Н.А. Теплякова, Н.В. Сидоров, М.Н. Палатников

*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»  
184209, Россия, Мурманская область, Апатиты, Академгородок, 26а  
n.tepliakova@ksc.ru*

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.207

**Аннотация:** С использованием метода прямого легирования конгруэнтного расплава оксидами магния и гадолиния выращены композиционно однородные нелинейно оптические монокристаллы двойного легирования с разным содержанием легирующих примесей:  $\text{LiNbO}_3:\text{Gd}^{3+}(0,003):\text{Mg}^{2+}(0,65 \text{ мас. \%})$ ,  $\text{LiNbO}_3:\text{Gd}^{3+}(0,23):\text{Mg}^{2+}(0,75 \text{ мас. \%})$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Gd}^{3+}(0,25):\text{Mg}^{2+}(0,75 \text{ мас. \%})$ . Полученные методами лазерной коноскопии и фотоиндуцированного рассеяния света результаты свидетельствуют о высоком структурном совершенстве выращенных кристаллов и позволяют утверждать, что кристаллы  $\text{LiNbO}_3:\text{Gd}:\text{Mg}$  по некоторым своим свойствам близки к стехиометрическому кристаллу. Одним из таких свойств стехиометрического и легированных магнием кристаллов  $\text{LiNbO}_3$ , важных для создания материалов для преобразования лазерного излучения на периодически поляризованных доменах субмикронных размеров с плоскими границами, является низкое значение коэрцитивного поля ( $\approx 2,3 \text{ кВ/см}$ ). При этом выращенные кристаллы  $\text{LiNbO}_3:\text{Gd}:\text{Mg}$  обладают значительно большей оптической однородностью, чем стехиометрический кристалл. Наибольшей оптической однородностью, а также отсутствием эффекта фоторефракции отличаются кристаллы  $\text{LiNbO}_3:\text{Gd}^{3+}(0,003):\text{Mg}^{2+}(0,65 \text{ мас. \%})$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Gd}^{3+}(0,23):\text{Mg}^{2+}(0,75 \text{ мас. \%})$ . Увеличение концентрации гадолиния до 0,25 мас. % приводит к усилению искажений коноскопической картины и к появлению значительного фоторефрактивного отклика кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Gd}^{3+}(0,25):\text{Mg}^{2+}(0,75 \text{ мас. \%})$ .

*Ключевые слова:* ниобат лития, кристалл, дефекты, лазерная коноскопия, фоторефрактивные свойства.

Для создания высокосовершенных материалов для преобразования излучения в настоящее время наиболее перспективны кристаллы ниобата лития, легированные магнием [1-4]. При этом двойным легированием, когда одним из легирующих элементов является магний, можно создавать оптические материалы повышенной композиционной однородности с минимальным временем фоторефрактивного отклика и высокой стойкостью к оптическому повреждению [5-7]. В данной работе методами лазерной коноскопии и фотоиндуцированного рассеяния света исследованы особенности композиционной однородности и фоторефрактивные свойства монокристаллов двойного легирования  $\text{LiNbO}_3:\text{Gd}:\text{Mg}$ .

Исследованные кристаллы были выращены в воздушной атмосфере из расплава методом Чохральского на ростовой установке индукционного

типа «Кристалл 2» в условиях малого ( $\sim 2,5$  град/см) осевого градиента в направлении полярной оси (001). Скорость вращения кристаллической були составляла  $\sim 16-18$  об/мин, скорость вытягивания кристалла  $\sim 0,7$  мм/час. При этом скорость приращения кристалла составляла  $\sim 1,02-1,04$  мм/час. Технологические параметры роста соответствовали условию плоского фронта кристаллизации. Осуществлялось прямое легирование конгруэнтного расплава оксидами  $MgO$  и  $Gd_2O_3$ . Установки для регистрации коноскопических картин и картин фотоиндуцированного рассеяния света описаны в монографии [8].

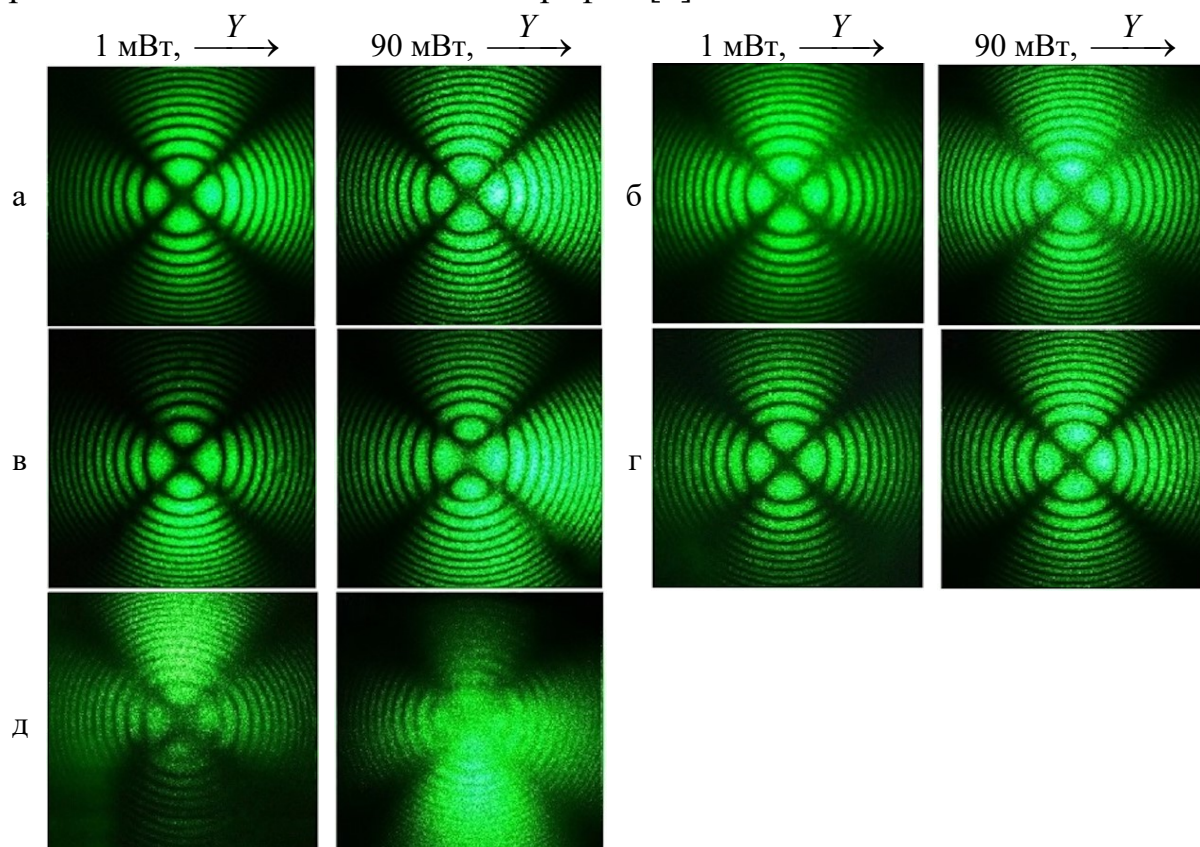


Рис. 1. Коноскопические картины кристаллов: а –  $LiNbO_3 : Gd^{3+} (0,003) : Mg^{2+} (0,65 \text{ мас.}\%)$ ; б –  $LiNbO_3 : Gd^{3+} (0,23) : Mg^{2+} (0,75 \text{ мас.}\%)$ ; в –  $LiNbO_3 : Gd^{3+} (0,25) : Mg^{2+} (0,75 \text{ мас.}\%)$ , г –  $LiNbO_{3 \text{ конгр}}$ ; д –  $LiNbO_{3 \text{ стех}}$ ,  $\lambda = 532$  нм,  $P = 1$  и 90 мВт.

На рис. 1 представлены коноскопические картины исследованных кристаллов, а также кристаллов стехиометрического и конгруэнтного составов, полученные при разных мощностях возбуждающего лазерного излучения 1 и 90 м Вт. При облучении исследованных нами кристаллов излучением мощностью 1 мВт фоторефрактивный эффект отсутствует и не наблюдается раскрытие индикатрисы фотоиндуцированного рассеяния света (ФИРС). В этом случае коноскопические картины отражают состояние структурной дефектности кристалла в отсутствие эффекта фоторефракции [8]. При возбуждении излучением лазера мощностью

90 мВт в коноскопических картинах проявляются как собственная дефектность кристалла (определяемая составом и условиями выращивания кристалла), так и дефектность, наведенная лазерным излучением. Для исследования влияния ФИРС на коноскопические картины, кристаллы предварительно облучались лазерным излучением мощностью 160 мВт. Из рис. 1 видно, что коноскопические картины с максимальным количеством дефектов получены для кристалла  $LiNbO_{3cmex}$  (см. рис. 1 д). На коноскопических картинах кристалла  $LiNbO_{3cmex}$  имеются признаки аномальной оптической двуосности, при которой имеет место деформация оптической индикатрисы кристалла в направлении, соответствующем направлению сдвига частей «мальтийского креста». При этом изохромы вытягиваются в направлении смещения фрагментов креста и приобретают вид эллипсов. Коноскопическая картина на рис. 1 д значительно размыта. Такие аномалии коноскопических картин указывают на значительную оптическую неоднородность кристалла  $LiNbO_{3cmex}$ . Увеличение мощности лазерного излучения (см. рис. 1 д), приводит к снижению контраста и резкости изображения, а также к заметному «размытию» ветвей «мальтийского креста». Значительное искажение коноскопических картин для кристалла  $LiNbO_{3cmex}$  при увеличении мощности лазерного излучения до 90 мВт очевидно связано с наличием значительного фоторефрактивного отклика. Раскрытие индикатрисы рассеяния с появлением спекл-структуры ФИРС происходит для этого кристалла в течение минуты (см. рис. 2 г).

Практически идеальные коноскопические картины получены для кристаллов  $LiNbO_{3конгр}$  (см. рис. 1 г) и  $LiNbO_3 : Gd^{3+} (0,003) : Mg^{2+} (0,65 \text{ мас.}\%)$  (см. рис. 1 а). Коноскопические картины на рис. 1 а, г, соответствуют одноосным кристаллам – на фоне концентрических колец-изохром ветви «мальтийского креста», сформированные двумя изогирами минимальной интенсивности, пересекаются в центре поля зрения, перпендикулярны друг другу и совпадают с осями пропускания поляризатора и анализатора. Такой вид коноскопических картин указывает на оптическую однородность кристаллов  $LiNbO_{3конгр}$  и  $LiNbO_3 : Gd^{3+} (0,003) : Mg^{2+} (0,65 \text{ мас.}\%)$  и их хорошее оптическое качество. Увеличение мощности лазерного излучения до 90 мВт не приводит к появлению дополнительных искажений на коноскопических картинах, что связано с отсутствием фоторефрактивного отклика данных кристаллов (см. рис. 2 а, д).

Коноскопические картины кристалла  $LiNbO_3 : Gd^{3+} (0,23) : Mg^{2+} (0,75 \text{ мас.}\%)$ , (см. рис. 1 б) также соответствуют одноосным кристаллам, однако отличаются от коноскопических картин кристаллов  $LiNbO_{3конгр}$  и  $LiNbO_3 : Gd^{3+} (0,003) : Mg^{2+} (0,65 \text{ мас.}\%)$  (см. рис. 1 а, г), выраженной размытостью изображения. Такое «размытие» коноскопической картины

наблюдалось для кристалла  $LiNbO_{3\text{смex}}$  (см. рис. 1 д) и указывало на его значительную оптическую неоднородность. Коноскопические картины кристалла  $LiNbO_3 : Gd^{3+} (0,25) : Mg^{2+} (0,75 \text{ мас.}\%)$  (см. рис. 1 в), имеют признаки аномальной оптической двуосности: деформация «мальтийского креста» с расхождением его фрагментов в вертикальном направлении, углы между ветвями отличны от  $90^\circ$ .

Это может быть связано с существованием областей в кристалле, обладающих двулучепреломлением, вследствие локального понижения симметрии из-за неравномерного вхождения легирующей примеси в структуру кристалла при выращивании. При увеличении мощности лазерного излучения до 90 мВт признаки аномальной оптической двуосности усиливается: расхождение фрагментов «мальтийского креста» в вертикальном направлении увеличивается, наблюдается просветление в центре «мальтийского креста» (см. рис. 1 в). Усиление искажений коноскопической картины кристалла  $LiNbO_3 : Gd^{3+} (0,25) : Mg^{2+} (0,75 \text{ мас.}\%)$  при увеличении мощности лазерного излучения так же, как и для кристалла  $LiNbO_{3\text{смex}}$  (см. рис. 1 д), очевидно связано с наличием значительного фоторефрактивного отклика кристалла  $LiNbO_3 : Gd^{3+} (0,25) : Mg^{2+} (0,75 \text{ мас.}\%)$  (см. рис. 2 в).

На рис. 2 представлены картины ФИРС исследованных кристаллов. Из рис. 2 видно, что для кристаллов  $LiNbO_{3\text{конгр}}$ ,  $LiNbO_3 : Gd^{3+} (0,003) : Mg^{2+} (0,65 \text{ мас.}\%)$ ,  $LiNbO_3 : Gd^{3+} (0,23) : Mg^{2+} (0,75 \text{ мас.}\%)$ , даже после облучения в течение 6 минут, индикатриса ФИРС не раскрывается, а наблюдается только круговое рассеяние на статических структурных дефектах (см. рис. 2 а, б, д). Картины ФИРС кристаллов  $LiNbO_3 : Gd^{3+} (0,003) : Mg^{2+} (0,65 \text{ мас.}\%)$ ,  $LiNbO_3 : Gd^{3+} (0,23) : Mg^{2+} (0,75 \text{ мас.}\%)$  практически не изменяются с течением времени (см. рис. 2 а, б). Картины ФИРС кристаллов  $LiNbO_3 : Gd^{3+} (0,25) : Mg^{2+} (0,75 \text{ мас.}\%)$  и  $LiNbO_{3\text{смex}}$  значительно изменяются в течение времени уже в первые секунды облучения (см. рис. 2 в, г). Индикатриса ФИРС трансформируется в овальную («кометообразную») форму, ориентированную вдоль полярной оси кристалла. Наличие ФИРС свидетельствует о наличии фоторефрактивного эффекта в монокристаллах ниобата лития стехиометрического состава и  $LiNbO_3 : Gd^{3+} (0,25) : Mg^{2+} (0,75 \text{ мас.}\%)$ . При этом различия в картинах ФИРС монокристаллов  $LiNbO_3 : Gd^{3+} (0,25) : Mg^{2+} (0,75 \text{ мас.}\%)$  и  $LiNbO_{3\text{смex}}$  могут быть обусловлены разными особенностями расположения в структуре, видом и разной концентрацией дефектов с локализованными на них электронами, определяющих величину фоторефрактивного эффекта.

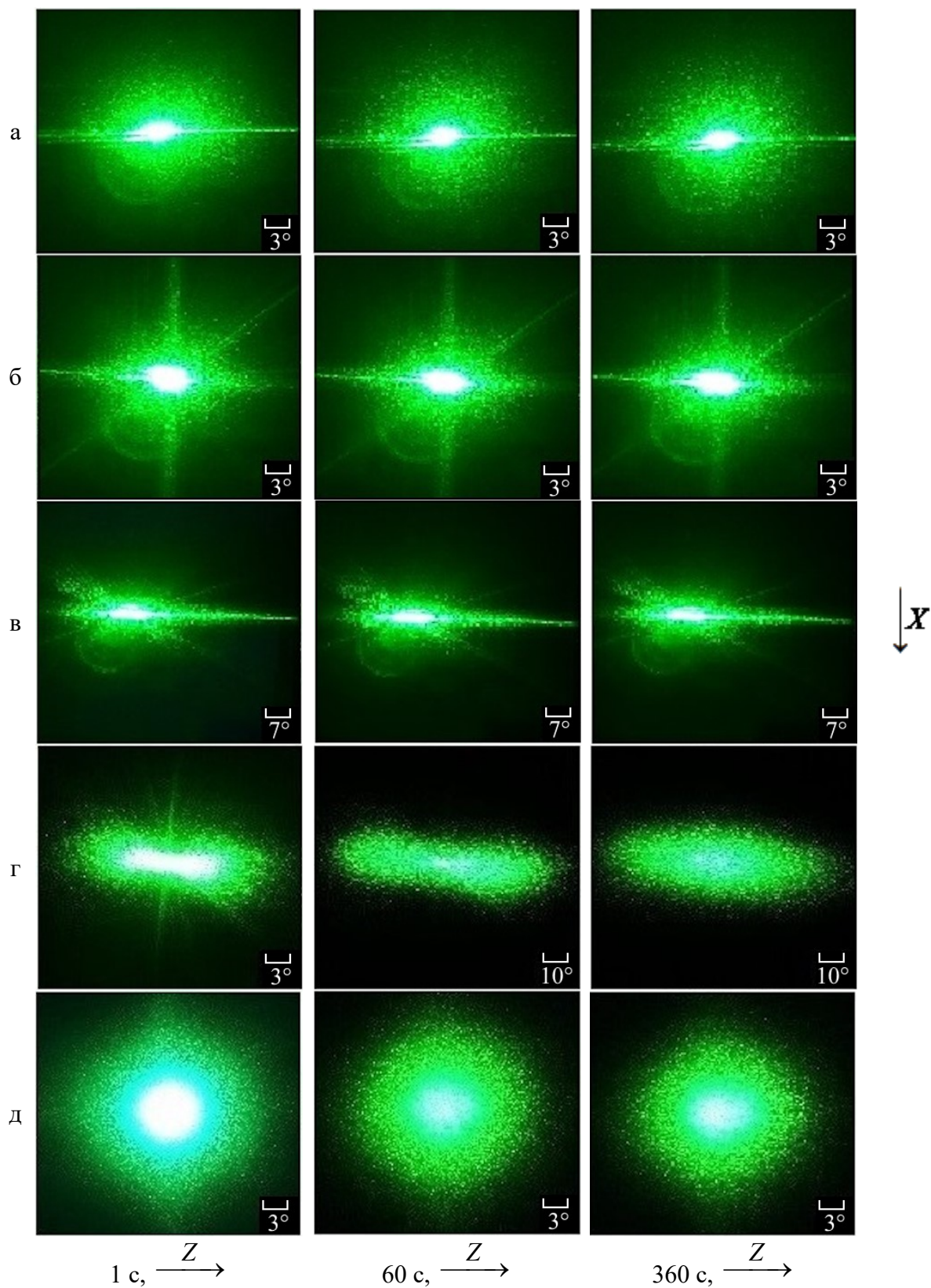


Рис. 2. Картины ФИРС кристаллов: а –  $LiNbO_3 : Gd^{3+} (0,003) : Mg^{2+} (0,65 \text{ мас.}\%)$ ; б –  $LiNbO_3 : Gd^{3+} (0,23) : Mg^{2+} (0,75 \text{ мас.}\%)$ ; в –  $LiNbO_3 : Gd^{3+} (0,25) : Mg^{2+} (0,75 \text{ мас.}\%)$ ; г –  $LiNbO_{3\text{конгр}}$ ; д –  $LiNbO_{3\text{стех}}$ ,  $\lambda = 532 \text{ нм}$ ,  $P = 160 \text{ мВт}$ .

Важную роль при этом могут играть также различия в значении величины  $Li/Nb$ , определяющей как тонкие особенности упорядочения структурных единиц катионной подрешетки кристалла, так и состояние ее дефектности, существенно влияющей на сегнетоэлектрические свойства ниобата лития [9].

Как известно, фоторефрактивный эффект обусловлен захватом на глубоких ловушках в запрещенной зоне фотоэлектронов, дрейфующих в поле, возникающем при освещении кристалла вследствие проявления фотовольтаического эффекта в нецентросимметричной среде [10, 11]. Поскольку в обоих случаях при выращивании монокристаллов  $LiNbO_3 : Gd^{3+} (0,25) : Mg^{2+} (0,75 \text{ мас.}\%)$  и  $LiNbO_{3 \text{ стех}}$  использованы исходные компоненты одинаковой квалификации (осч), кристаллы имеют весьма близкий состав малых количеств неконтролируемых примесей и соответственно, имеют сравнимое количество глубоких ловушек в запрещенной зоне, связанных с примесными дефектами. С другой стороны, в кристаллах могут образовываться мелкие электронные ловушки электронов вблизи дна зоны проводимости, («уровни прилипания») с энергетическими уровнями около 2,34 эВ, что соответствует энергии света на длине волны 532 нм, которые могут заметно повышать фоторефрактивный эффект за счет повышения эффективности излучательной рекомбинации фотовозбужденных носителей без их захвата на глубокие уровни [11]. Эффективность такой рекомбинации в значительной степени определяет интенсивность люминесценции в таких кристаллах [11]. Монокристаллы, обладающие меньшей дефектностью, обладают максимальной интенсивностью люминесценции и повышенной стойкостью к оптическому повреждению. Полученные результаты показывают, что между упорядочением структурных единиц и дефектов вдоль полярной оси кристалла и состоянием его электронной подсистемы наблюдается существенная связь, требующая дальнейшего исследования. Исследование природы возникновения в реальных кристаллах таких дефектов, определяющих фоторефрактивные свойства материалов, является важной научной задачей.

#### Библиографический список:

1. **Kemlin, V.** Dual-wavelength source from 5% MgO:PPLN cylinders for the characterization of nonlinear infrared crystals / V. Kemlin, D. Jegouso, J. Debray, et al. // *Optics Express*. – 2013. – V. 21. – I. 23. – P. 28886-28891. DOI: 10.1364/OE.21.028886.
2. **Murray, R.T.** High average power parametric wavelength conversion at 3.31–3.48  $\mu\text{m}$  in MgO:PPLN / R.T. Murray, T.H. Runcorn, S. Guha, et al. // *Optics Express*. – 2017. – V. 25. – I. 6. – P. 6421-6430. DOI: 10.1364/OE.25.006421.
3. **Сидоров, Н.В.** Сравнительные исследования особенностей структуры и композиционной однородности монокристаллов  $LiNbO_3 : Mg(\sim 5.3 \text{ мол.}\%)$ , выращенных из шихты различного генезиса / Н.В. Сидоров, Л.А. Бобрева, Н.А. Теплякова и др. // *Неорганические материалы*. – 2019. – Т. 55. – № 11. – С. 1197-1203. DOI: 10.1134/S0002337X19100142.

4. Сидоров, Н.В. Влияние способа легирования на однородность и оптические свойства кристаллов LiNbO<sub>3</sub>:Mg / Н.В. Сидоров, Н.А. Теплякова, М.Н. Палатников // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2021. – Вып. 13. – С. 383-391. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.383.
5. Liu, J. Growth and optical properties of Pr-Mg co-doped LiNbO<sub>3</sub> crystal using Bridgman method / J. Liu, A. Liu, Y. Chen et al. // Physica B: Condensed Matter. – 2022. – V. 624. – Art. № 413419. – 6 p. DOI: 10.1016/j.physb.2021.413419.
6. Kong, T. Enhanced ultraviolet damage resistance in magnesium doped lithium niobate crystals through zirconium co-doping / T. Kong, Y. Luo, W. Wang et al. // Materials. – 2021. – V. 14. – I. 4. – Art. № 1017. – 6 p. DOI: 10.3390/ma14041017.
7. Zhang, P. Efficient enhanced 1.54 μm emission in Er/Yb:LiNbO<sub>3</sub> crystal codoped with Mg<sup>2+</sup> ions / P. Zhang, J. Yin, L. Zhang et al. // Optical Materials. – 2014. – V. 36. – I. 12. – P. 1986-1990. DOI: 10.1016/j.optmat.2014.01.033.
8. Сидоров, Н.В. Лазерная коноскопия и фотоиндуцированное рассеяние света в исследованиях свойств нелинейно-оптического кристалла ниобата лития / Н.В. Сидоров, О.Ю. Пиккуль, Н.А. Теплякова, М.Н. Палатников. – М.: РАН, 2019. – 350 с.
9. Кузьминов, Ю.С. Электрооптический и нелинейнооптический кристалл ниобата лития / Ю.С. Кузьминов. – М.: Наука, 1987. – 264 с.
10. Volk, T. Lithium niobate. Defects, photorefractive and ferroelectric switching / T. Volk, M. Wohlecke. – Berlin: Springer, 2008. – 250 p. DOI: 10.1007/978-3-540-70766-0.
11. Блистанов, А.А. Рекомбинационные процессы в кристаллах LiNbO<sub>3</sub> / А.А. Блистанов, В.М. Любченко, А.Н. Горюнова. // Кристаллография. – 1998. – Т. 43. – № 1. – С. 86-91.

#### References:

1. Kemlin V., Jegouso D., Debray J. et al. Dual-wavelength source from 5% MgO:PPLN cylinders for the characterization of nonlinear infrared crystals, *Optics Express*, 2013, vol. 21, issue 23, pp. 28886-28891. DOI: 10.1364/OE.21.028886.
2. Murray R.T., Runcorn T.H., Guha S. et al. High average power parametric wavelength conversion at 3.31-3.48 μm in MgO:PPLN, *Optics Express*, 2017, vol. 25, issue 6, pp. 6421-6430. DOI: 10.1364/OE.25.006421.
3. Sidorov N.V., Bobreva L.A., Teplyakova N.A. et al. A comparative study of the structure and chemical homogeneity of LiNbO<sub>3</sub>:Mg (~ 5.3 mol%) crystals grown from charges of different origins, *Inorganic Materials*, 2019, vol. 55, issue 11, pp. 1132-1137. DOI: 10.1134/S0020168519100145.
4. Sidorov N.V., Teplyakova N.A., Vliyanie sposob legirovaniya na odnorodnost' i opticheskie svoystva kristallov LiNbO<sub>3</sub>:Mg [Influence of the method of doping on uniformity and optical properties of LiNbO<sub>3</sub>:Mg crystals], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2021, issue 13, pp. 383-391. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.383. (In Russian).
5. Liu J., Liu A., Chen Y. et al. Growth and optical properties of Pr-Mg co-doped LiNbO<sub>3</sub> crystal using Bridgman method, *Physica B: Condensed Matter*, 2022, vol. 624, art. no. 41341, 6 p. DOI: 10.1016/j.physb.2021.413419.
6. Kong T., Luo Y., Wang W. et al. Enhanced ultraviolet damage resistance in magnesium doped lithium niobate crystals through zirconium co-doping, *Materials*, 2021, vol. 14, issue 4, art. no. 1017, 6 p. DOI: 10.3390/ma14041017.
7. Zhang P., Yin J., Zhang L. et al. Efficient enhanced 1.54 μm emission in Er/Yb:LiNbO<sub>3</sub> crystal codoped with Mg<sup>2+</sup> ions, *Optical Materials*, 2014, vol. 36, issue 12, pp. 1986-1990. DOI: 10.1016/j.optmat.2014.01.033.
8. Sidorov N.V., Pikoul O.Y., Teplyakova N.A., Palatnikov M.N. *Lazernaya konoskopiya i fotoindutsirovannoe rasseyaniye sveta v issledovaniyakh svojstv nelinejno-opticheskogo kristalla niobata litiya* [Laser conoscopy and photoinduced light scattering in studies of the properties of a nonlinear optical single crystal of lithium niobate]. Moscow, RAS Publ., 2019, 350 p. (In Russian).
9. Kuz'minov Yu.S. *Elektroopticheskij i nelinejnoopticheskij kristall niobata litiya* [Electro-optical and nonlinear-optical crystal of lithium niobate]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 264 p. (In Russian).
10. Volk T., Wohlecke M. *Lithium niobate. Defects, photorefractive and ferroelectric switching*. Berlin, Springer, 2008, 250 p. DOI: 10.1007/978-3-540-70766-0.
11. Blistanov A.A., Lyubchenko V.M., Goryunova A.N. Recombination processes in LiNbO<sub>3</sub> crystals, *Crystallography Reports*, 1998, vol. 43, issue 1, pp. 78-82.

**OPTICAL PROPERTIES OF DOUBLE DOPED  $\text{LiNbO}_3\text{:Gd:Mg}$  CRYSTALS**

N.A. Teplyakova, N.V. Sidorov, M.N. Palatnikov

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

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.207

**Abstract:** By direct alloying of congruent melt with magnesium and gadolinium oxides, compositionally uniform nonlinear optical single double doped crystals with different content of dopants have been grown:  $\text{LiNbO}_3\text{:Gd}^{3+}(0,003)\text{:Mg}^{2+}(0,65 \text{ wt. } \%)$ ,  $\text{LiNbO}_3\text{:Gd}^{3+}(0,23)\text{:Mg}^{2+}(0,75 \text{ wt. } \%)$  and  $\text{LiNbO}_3\text{:Gd}^{3+}(0,25)\text{:Mg}^{2+}(0,75 \text{ wt. } \%)$ . The results obtained by laser conoscopy and photoinduced light scattering indicate a high structural perfection of the grown crystals. The results give grounds to assert that  $\text{LiNbO}_3\text{:Gd:Mg}$  crystals are close to a stoichiometric crystal in some of their properties. A low value of the coercive field ( $\approx 2,3 \text{ kV/cm}$ ) is one of such properties of stoichiometric and magnesium-doped  $\text{LiNbO}_3$  crystals, which are important for creating materials for laser radiation conversion on periodically polarized submicron-sized domains with flat boundaries. In this case, the grown  $\text{LiNbO}_3\text{:Gd:Mg}$  crystals have a much higher optical uniformity than a stoichiometric crystal. Crystals of  $\text{LiNbO}_3\text{:Gd}^{3+}(0,003)\text{:Mg}^{2+}(0,65 \text{ wt. } \%)$  and  $\text{LiNbO}_3\text{:Gd}^{3+}(0,23)\text{:Mg}^{2+}(0,75 \text{ wt. } \%)$  have the highest optical uniformity and the absence of the photorefractive effect. Increase of gadolinium concentration to 0,25 wt. % leads to increased distortion of the conoscopic pattern and to the appearance of a significant photorefractive response of the  $\text{LiNbO}_3\text{:Gd}^{3+}(0,25)\text{:Mg}^{2+}(0,75 \text{ wt. } \%)$  crystal.

*Keywords:* lithium niobate, crystal, defects, laser conoscopy, photorefractive properties.

*Теплякова Наталья Александровна – к.ф.-м.н., старший 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 Российской академии наук»*

*Сидоров Николай Васильевич – д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник с исполнением обязанностей заведующего сектором 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 Российской академии наук»*

*Палатников Михаил Николаевич – д.т.н., главный научный сотрудник с сохранением обязанностей заведующего лабораторией 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»*

*Natalya A. Teplyakova – Ph. D., Senior 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 Russian Academy of Sciences»*

*Nikolay V. Sidorov – Dr. Sc., Professor, Chief Researcher and as Head of the Vibrational Spectroscopy Sector of the Electronic Engineering Materials Laboratory, Tananaev Institute of Chemistry – Subdivision of the Federal Research Centre «Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences»*

*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 Russian Academy of Sciences»*

Поступила в редакцию/received: 14.06.2023; после рецензирования/reviised: 07.07.2023; принята/accepted: 15.07.2023.