

Научная статья
УДК 539.26, 530.182
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.3.030

РАСЧЕТ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРИСТАЛЛОВ $\text{LiNbO}_3\text{:Zn:Mg}$, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИЯМ ПРЯМОГО И ГОМОГЕННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

**Александра Владимировна Кадетова¹, Михаил Николаевич Палатников²,
Ольга Владимировна Токко³, Андрей Иванович Прусский⁴**

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

^{3,4}Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск, Россия

¹ttyc9@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3605-0897>

²m.palatnikov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9686-0563>

³solvak@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5928-7198>

⁴prusskii@petrsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2381-6662>

Аннотация

Выполнены расчеты коэффициентов нелинейного оптического тензора второго порядка (d_{ij}) для кристаллов ниобата лития двойного легирования магнием и цинком разными методами ввода примеси. Концентрации примесей (Zn, Mg) в кристаллах в случае прямого легирования составили 3,74:1.09 мол. %, гомогенного — 3,83:0,97 мол. %. Было показано, что эффективность преобразования излучения с генерацией второй гармоники в кристалле гомогенного легирования выше, чем в кристалле, полученном методом прямого легирования.

Ключевые слова:

ниобат лития, нелинейно-оптическая восприимчивость, дефекты, структурные характеристики

Финансирование:

исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-20114 (<https://rscf.ru/project/22-22-20114/>), проводимого совместно с Республикой Карелия с финансированием из Фонда венчурных инвестиций Республики Карелия (ФВИ РК).

Для цитирования:

Расчет нелинейно-оптических характеристик кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Zn:Mg}$, полученных по технологиям прямого и гомогенного легирования / А. В. Кадетова, М. Н. Палатников, О. В. Токко, А. И. Прусский // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 3. С. 164–169. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.3.030.

Original article

THE CALCULATION OF NONLINEAR OPTICAL CHARACTERISTICS OF $\text{LiNbO}_3\text{:Zn:Mg}$ CRYSTALS OBTAINED BY DIRECT AND HOMOGENEOUS DOPING TECHNOLOGIES

Aleksandra V. Kadetova¹, Mikhail N. Palatnikov², Olga V. Tokko³, Andrey I. Prusskii⁴

^{1,2}I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials
of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

^{3,4}Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia

¹ttyc9@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3605-0897>

²m.palatnikov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9686-0563>

³solvak@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5928-7198>

⁴prusskii@petrsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2381-6662>

Abstract

The coefficients of the second-order nonlinear optical tensor (d_{ij}) for lithium niobate crystals doubly doped with magnesium and zinc by different methods of impurity introduction were calculated. Impurity concentrations (Zn:Mg) in crystals were 3.74:1.09 mol. % in case of direct doping, 3.83:0.97 mol. % in case of homogeneous doping. It was shown that the efficiency of radiation conversion with second harmonic generation in a homogeneously doped crystal is higher than in a crystal obtained by the direct doping method.

Keywords:

lithium niobate, nonlinear optical susceptibility, defect structure, structural characteristics

Funding:

the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-22-20114 (<https://rscf.ru/project/22-22-20114/>), conducted jointly with the Republic of Karelia with funding from the Venture Investment Fund of the Republic of Karelia (VFI RK).

For citation:

The calculation of nonlinear optical characteristics of $\text{LiNbO}_3\text{:Zn:Mg}$ crystals obtained by direct and homogeneous doping technologies / A. V. Kadetova M. N. Palatnikov, O. V. Tokko, A. I. Prusskii // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 3. P. 164–169. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.3.030.

Введение

Кристаллы ниобата лития характеризуются высокими значениями нелинейно-оптических коэффициентов, что обуславливает их применение в качестве среды для генерации второй гармоники [1]. Многочисленные исследования были направлены на поиск путей подавления фоторефрактивного эффекта, который является лимитирующим фактором при использовании ниобата лития в нелинейной оптике [2].

Было показано, что легирование магнием и цинком приводит к заметному снижению фоторефрактивного эффекта [2, 3], однако практический интерес представляет введение в кристалл в различном концентрационном соотношении двух допирующих примесей, так как подобные сочетания открывают новые возможности в управлении нелинейно-оптическими свойствами кристаллов [4, 5].

Целью данной работы была теоретическая оценка эффективности преобразования второй гармоники в кристаллах, легированных одновременно двумя примесями — магнием и цинком. Кристаллы были получены по технологиям прямого и гомогенного легирования при схожих концентрациях примесей лабораторией материалов электронной техники ИХТРЭМС КНЦ РАН. Концентрации примесей в исследуемых кристаллах: в случае прямого легирования — 3,74:1,09 мол. % (Zn:Mg), гомогенного — 3,83:0 мол. % (Zn:Mg).

Результаты исследований

При прямом легировании примесь добавлялась в форме оксида металла в гранулированную шихту ниобата лития перед наплавлением тигля [6]. Гомогенное легирование проводилось путем ввода примеси в пентаоксид ниобия Nb_2O_5 на стадии его выделения из высокочистых ниобийсодержащих растворов [7].

Расчеты коэффициентов нелинейного оптического тензора второго порядка d_{ij} выполнялись методом, разработанным на основе теории диэлектриков J. C. Phillips и V. J. Van [8] и модели зарядовой связи B. F. Levine [9]. Для кристаллов ниобата лития (пространственная группа симметрии $R3c$) рассчитывались три независимых тензорных коэффициента: d_{22} , d_{31} и d_{33} .

Подробный расчет для кристаллов ниобата лития различного состава представлен в работах [10, 11]. Для расчетов необходимы знания о структурном состоянии кристаллов, в частности, значения периодов элементарной ячейки, межионные расстояния в октаэдрах LiO_6 и NbO_6 . Структурные характеристики исследуемых кристаллов были получены методом рентгеновской дифракции. Рентгенограммы регистрировались на дифрактометре ДРОН-6 в монохроматическом $\text{CuK}\alpha$ -излучении в интервале углов рассеяния 2θ от 5° до 145° . Уточнение структурных характеристик проводилось методом Ритвельда [12]. На рис. 1 приведены графические результаты уточнения для исследуемых образцов. Разностная кривая показывает степень несовпадения теоретической рентгенограммы и экспериментальной. На рис. 1 также приведены уточненные значения периодов, на рис. 2 приведены рассчитанные расстояния в кислородных октаэдрах LiO_6 и NbO_6 .

Квадратичная нелинейная восприимчивость кристалла d_{ij} , определяющая интенсивность второй оптической гармоники, описывается тензором третьего ранга и рассчитывается по формуле

$$d_{ij} = \sum_{\mu} \left\{ \frac{G_{ij}^{\mu} N_b^{\mu}(0,5) \left\{ \frac{\left[(Z_A^{\mu})^* + n(Z_B^{\mu})^* \right]}{\left[(Z_A^{\mu})^* - n(Z_B^{\mu})^* \right]} \right\} f_i^{\mu} (\chi_b^{\mu})^2}{d^{\mu} q^{\mu}} + \frac{G_{ij}^{\mu} N_b^{\mu}(2s-1) \left[\frac{r_0^{\mu}}{(r_0^{\mu} - r_c^{\mu})} \right]^2 f_c^{\mu} (\chi_b^{\mu})^2 \rho^{\mu}}{d^{\mu} q^{\mu}} \right\}, \quad (1)$$

где d^μ — межионное расстояние; G_{ij}^μ — геометрический вклад связей типа μ ; различие в размерах атомов $\rho^\mu = (r_A^\mu - r_B^\mu)/(r_A^\mu + r_B^\mu)$; r_A^μ и r_B^μ — ковалентные радиусы атомов A и B ; r_0^μ — средние значения радиусов атомов A и B в Å; r_c^μ — радиус ядра и $r_c^\mu = 0,35 r_0^\mu$; q^μ — заряд μ -й связи; Z_A^μ , Z_B^μ — число эффективных валентных электронов; N_b^μ — число связей на кубический сантиметр; χ_b^μ — восприимчивость одной связи типа μ ; f_i^μ и f_c^μ — доли ионности и ковалентности отдельных связей типа μ .

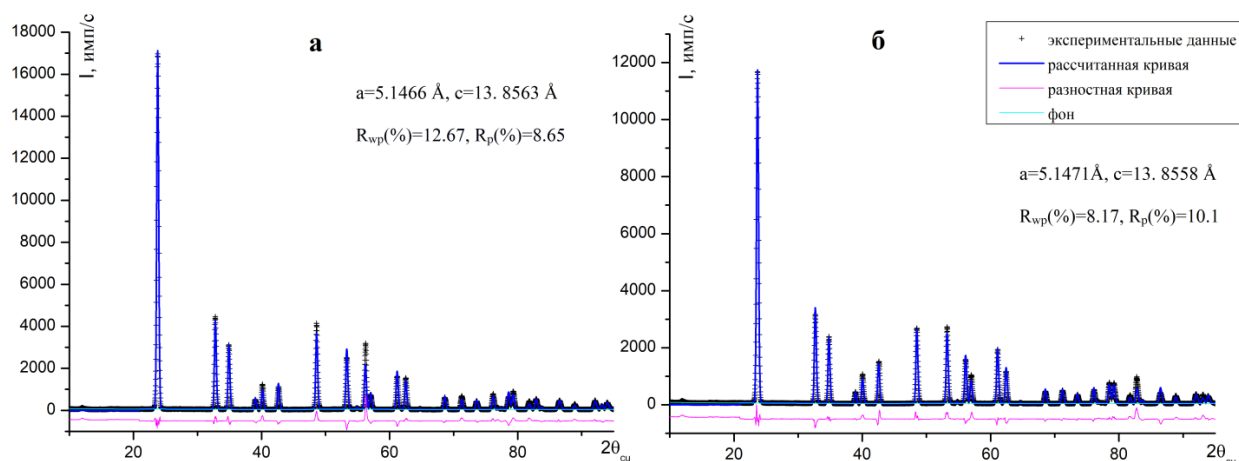


Рис. 1. Графический результат полнопрофильного анализа для образцов $\text{LiNbO}_3\text{:Zn:Mg}$ с концентрацией цинка и магния: *a* — 3,74:1,09 мол. % (Zn:Mg) прямое легирование; *b* — 3,83:0,97 мол. % (Zn:Mg) гомогенное легирование

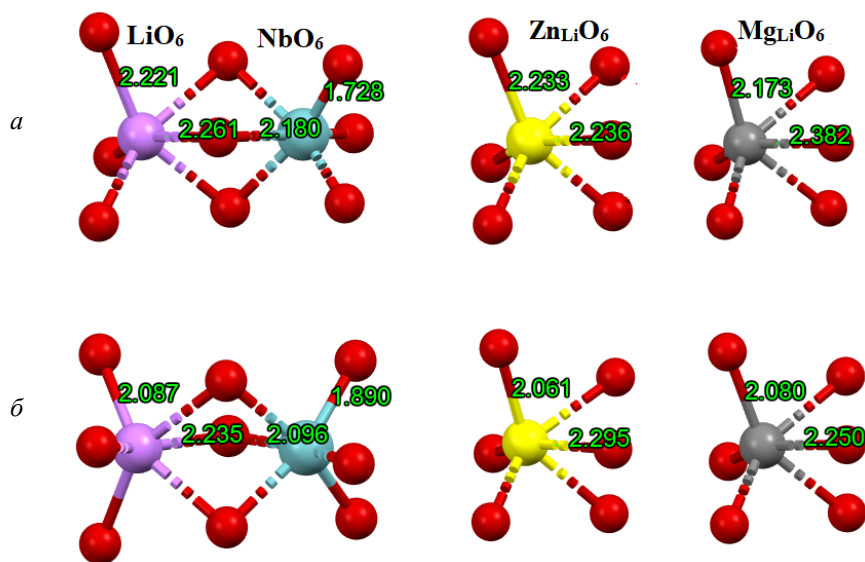
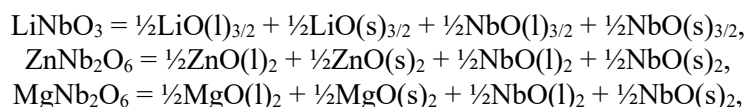


Рис. 2. Межионные расстояния (Å) в октаэдрах LiO_6 , NbO_6 , ZnLiO_6 , MgLiO_6 в кристаллах $\text{LiNbO}_3\text{:Zn:Mg}$, полученных: *a* — прямым легированием 3,74:1,09 мол. % (Zn:Mg); *b* — гомогенным легированием 3,83:0,97 мол. % (Zn:Mg)

При расчете d_{ij} для легированных кристаллов необходимо учитывать модель расположения примеси, искажения структуры при внедрении примеси, валентность и эффективный радиус примесного атома. Для облегчения расчетов мы рассматривали наши кристаллы как смесь соединений $(1-x)(\text{LiNbO}_3)$, $(x/2)(\text{ZnNb}_2\text{O}_6)$ и $(x/2)(\text{MgNb}_2\text{O}_6)$. Суммарные значения d_{ij} по всем связям считаются с учетом концентраций примесей и заселенностей позиций лития и ниобия.

Рассматриваемые многосвязные соединения LiNbO_3 , ZnNb_2O_6 и MgNb_2O_6 разбивались на сумму одиночных связей [10]:



где l — длинные связи и s — короткие связи между катионом и кислородом в октаэдре. Таким способом анализируется вклад каждого типа связей в суммарное значение коэффициентов нелинейно-оптической восприимчивости (d_{22} , d_{33} , d_{13}).

В табл. 1 приведены расчетные данные нелинейно-оптических коэффициентов для кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:Zn:Mg}$, полученного методом прямого легирования, с концентрациями 3,74:1,09 мол. % (Zn:Mg), а в табл. 2 — для кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:Zn:Mg}$, полученного методом гомогенного легирования с концентрациями 3,83:0,97 мол. % (Zn:Mg).

Таблица 1

Параметры химических связей, линейные и нелинейные оптические восприимчивости для кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:Zn:Mg}$ (3,74:1,09) мол. %, $\lambda = 1064$ нм

Параметры связи μ	(1-x)(LiNbO ₃)				(x/2)(ZnNb ₂ O ₆)				(x/2)(MgNb ₂ O ₆)			
	Li-O (l)	Li-O (s)	Nb-O (l)	Nb-O (s)	Zn-O (l)	Zn-O (s)	Nb-O (l)	Nb-O (s)	Mg-O (l)	Mg-O (s)	Nb-O (l)	Nb-O (s)
d_{μ} , Å	2,261	2,221	2,180	1,728	2,235	2,233	2,180	1,728	2,382	2,173	2,180	1,728
f_c^{μ}	0,620	0,623	0,200	0,212	0,449	0,450	0,219	0,238	0,436	0,450	0,217	0,236
χ^{μ}	3,178	3,082	5,781	3,850	3,852	3,846	4,869	3,326	4,058	3,484	4,965	3,385
q^{μ}/e	0,157	0,161	0,488	0,683	0,268	0,269	0,560	0,762	0,257	0,291	0,551	0,752
G^{μ}_{22}	-0,056	0,014	-0,062	0,098	-0,058	0,014	-0,062	0,098	-0,048	0,015	-0,062	0,098
d^{μ}_{22}	10,972	-2,594	3,02	-2,128	10,882	-2,581	2,206	-1,745	12,089	-2,822	2,292	-1,798
	$\sum d_{22} 9,269 \cdot 10^{-9}$ см/статВ				$\sum d_{22} 8,762 \cdot 10^{-9}$ см/статВ				$\sum d_{22} 9,761 \cdot 10^{-9}$ см/статВ			
	$\sum d_{22} 8,863$ см/статВ											
G^{μ}_{31}	0,177	-0,144	-0,183	0,185	0,179	-0,149	-0,183	0,185	0,167	-0,118	-0,183	0,185
d^{μ}_{31}	-34,905	26,724	8,895	-4,008	-33,854	28,066	6,498	-3,285	-42,515	22,292	6,749	-3,385
	$\sum d_{31} -3,294 \cdot 10^{-9}$ см/статВ				$\sum d_{31} -2,575 \cdot 10^{-9}$ см/статВ				$\sum d_{31} -16,859 \cdot 10^{-9}$ см/статВ			
	$\sum d_{22} -3,109$ см/статВ											
G^{μ}_{33}	0,351	-0,033	-0,312	0,111	0,339	-0,038	-0,312	0,111	0,405	-0,016	-0,312	0,111
d^{μ}_{33}	-69,161	6,171	15,134	-2,414	-64,081	7,139	11,056	-1,979	-102,91	3,011	11,484	-2,039
	$\sum d_{33} -50,270 \cdot 10^{-9}$ см/статВ				$\sum d_{33} -47,865 \cdot 10^{-9}$ см/статВ				$\sum d_{33} -90,454 \cdot 10^{-9}$ см/статВ			
	$\sum d_{22} -47,927$ см/статВ											

Таблица 2

Параметры химических связей, линейные и нелинейные оптические восприимчивости для кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:Zn:Mg}$ (3,83:0,97) мол. %, $\lambda = 1064$ нм

Параметры связи μ	(1-x)(LiNbO ₃)				(x/2)(ZnNb ₂ O ₆)				(x/2)(MgNb ₂ O ₆)			
	Li-O (l)	Li-O (s)	Nb-O (l)	Nb-O (s)	Zn-O (l)	Zn-O (s)	Nb-O (l)	Nb-O (s)	Mg-O (l)	Mg-O (s)	Nb-O (l)	Nb-O (s)
d_μ , Å	2,235	2,087	2,096	1,890	2,295	2,062	2,096	1,890	2,250	2,080	2,096	1,890
f_c^μ	0,645	0,659	0,217	0,222	0,452	0,471	0,226	0,234	0,472	0,486	0,238	0,247
χ^μ	3,070	2,727	5,507	4,588	4,040	3,392	4,593	3,866	3,740	3,287	4,814	4,051
q^μ/e	0,162	0,177	0,509	0,593	0,258	0,297	0,588	0,677	0,275	0,304	0,565	0,652
G^{μ}_{22}	-0,029	-0,022	-0,035	0,076	-0,027	-0,023	-0,035	0,076	-0,028	-0,022	-0,035	0,076
d^{μ}_{22}	5,470	3,354	1,779	-2,683	5,642	3,532	1,153	-1,829	6,693	4,182	1,444	-2,279
	$\sum d_{22} 7,920 \cdot 10^{-9}$ см/статВ.				$\sum d_{22} 8,499 \cdot 10^{-9}$ см/статВ.				$\sum d_{22} 10,041 \cdot 10^{-9}$ см/статВ.			
	$\sum d_{22} 7,661$ см/статВ											

Окончание таблицы 2

Параметры связи μ	(1-x)(LiNbO ₃)				(x/2)(ZnNb ₂ O ₆)				(x/2)(MgNb ₂ O ₆)			
	Li-O (l)	Li-O (s)	Nb-O (l)	Nb-O (s)	Zn-O (l)	Zn-O (s)	Nb-O (l)	Nb-O (s)	Mg-O (l)	Mg-O (s)	Nb-O (l)	Nb-O (s)
G^{μ}_{31}	0,172	-0,147	-0,183	0,183	0,165	-0,134	-0,183	0,183	0,171	-0,144	-0,183	0,183
d^{μ}_{31}	-32,669	22,123	9,328	-6,440	-35,402	20,565	6,048	-4,390	-40,516	26,783	7,570	-5,469
	$\sum d_{31} - 7,659 \cdot 10^{-9}$ см/статВ				$\sum d_{31} - 13,179 \cdot 10^{-9}$ см/статВ				$\sum d_{31} - 11,632 \cdot 10^{-9}$ см/статВ			
	$\sum d_{22} - 7,490$ см/статВ											
G^{μ}_{33}	0,381	-0,036	-0,312	0,103	0,408	-0,026	-0,312	0,103	0,388	-0,033	-0,312	0,103
d^{μ}_{33}	-72,346	5,414	15,923	-3,638	-86,479	3,914	10,325	-2,479	-92,046	6,171	12,923	-3,089
	$\sum d_{33} - 54,647 \cdot 10^{-9}$ см/статВ				$\sum d_{33} - 74,719 \cdot 10^{-9}$ см/статВ				$\sum d_{33} - 76,041 \cdot 10^{-9}$ см/статВ			
	$\sum d_{22} - 53,132$ см/статВ											

Полученные данные показывают, что размещение цинка и магния в позиции лития в целом усиливает эффективность преобразования второй гармоники, о чем говорит увеличение значений коэффициентов d_{ij} при учете соответствующих нелинейно-оптических коэффициентов связей Zn_{Li} -O, Mg_{Li} -O. При этом связи Li-O, Zn_{Li} -O, Mg_{Li} -O вносят наибольший вклад в суммарное значение коэффициентов d_{31} , d_{33} , d_{22} по соответствующим направлениям.

Выводы

Полученные результаты показывают, что значения коэффициентов d_{ij} для кристаллов $LiNbO_3:Zn:Mg$ (3,83:0,97 мол. %), полученных методом гомогенного легирования, выше, чем соответствующие значения для кристаллов $LiNbO_3:Zn:Mg$ (3,74:1,09 мол. %), полученных методом прямого легирования (см. табл. 1, 2). Таким образом, кристалл $LiNbO_3:Zn:Mg$ (3,83:0,97 мол. %), полученный методом гомогенного легирования, является наиболее подходящей средой для нелинейного преобразования излучения с генерацией второй гармоники.

Список источников

- Advances in lithium niobate photonics: development status and perspectives / G. Chen [et al.] // Advanced Photonics. 2022. Vol. 4 (3). P. 034003(1–43).
- Volk T., Wöhlecke M. Lithium Niobate. Defects, Photorefractive and Ferroelectric Switching. 1st ed. Berlin: Springer, 2009. P. 49.
- Effect of Mg concentration on the domain reversal of Mg-doped $LiNbO_3$ / Y. Chen [et al.] // Appl. Phys. Lett. 2005. Vol. 87. P. 212904(1–3).
- Electro-optic coefficients r_{13} and r_{33} of singly Er^{3+} -doped and In^{3+}/Er^{3+} -codoped $LiNbO_3$ crystals / W.-Y. Du [et al.] // J. Physics and Chemistry of Solids. 2016. Vol. 100. P. 101–106.
- Comparative study on optical properties of Yb^{3+} doped $LiNbO_3:MgO$ and $LiNbO_3:ZnO$ laser crystals / K. Ning [et al.] // Optics Communications. 2015. Vol. 349. P. 94–97.
- Palatnikov M. N., Sidorov N. V. Some Fundamental Points of Technology of Lithium Niobate and Lithium Tantalate Single Crystals // Oxide Electronics and Functional Properties of Transition Metal Oxides / ed. A. Pergament. 2014. Ch. II. P. 31–168.
- Получение и исследование кристаллов ниобата лития, легированных магнием и цинком / С. М. Маслбоева [и др.]. // Журнал неорганической химии. 2020. Т. 65, № 6. С. 856–864.
- Van V. J. Quantum Dielectric Theory of Electronegativity in Covalent Systems. I. Electronic Dielectric Constant // Phys. Rev. 1969. Vol. 182 (3). P. 891–905.
- Levine B. F. d-Electron Effects on Bond Susceptibilities and Ionicities // Phys. Rev. B. 1973. Vol. 7 (7). P. 2591–2600.
- Xue D., Betzler K., Hesse H. Chemical bond analysis of the second order nonlinear optical behavior of Zn-doped lithium niobate // Optics Communications. 2000. Vol. 182. P. 167–173.
- Xue D., Zhang S. Bond-charge calculation of nonlinear optical susceptibilities of $LiXO_3$ type complex crystals // Chem. Phys. 1998. Vol. 226. P. 307–318.
- Rietveld H. M. A Profile Refinement Method for Nuclear and Magnetic Structures // J. Appl. Cryst. 1969. Vol. 2. P. 65–71.

References

1. Chen G., Li N., Ng J. D., Lin H.-L., Zhou Y., Fu Y. H., Lee L. Y. T., Yu Y., Liu A.-Q., Danner A. J. Advances in lithium niobate photonics: development status and perspectives. *Advanced Photonics*, 2022, Vol. 4, No. 3, pp. 034003(1–43).
2. Volk T., Wöhlecke M. *Lithium Niobate. Defects, Photorefractive and Ferroelectric Switching*. Berlin, Springer, 2009, pp. 249.
3. Chen Y., Yan W., Guo J., Chen S., Zhang G., Xia Z. Effect of Mg concentration on the domain reversal of Mg-doped LiNbO₃. *Applied Physics Letters*, 2005, Vol. 87, pp. 212904 (1–3).
4. Du W.-Y., Zhang P., Zhang Z.-B., Ren S., Wong W.-H., Yu D.-Y., Pun E. Y.-B., Zhang D.-L. Electro-optic coefficients r_{13} and r_{33} of singly Er³⁺-doped and In³⁺/Er³⁺-codoped LiNbO₃ crystals. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2016, Vol. 100, pp. 101–106.
5. Ning K., Li B., Zhang Q., Hang Y., Shi Z. Comparative study on optical properties of Yb³⁺ doped LiNbO₃:MgO and LiNbO₃:ZnO laser crystals. *Optics Communications*, 2015, Vol. 349, pp. 94–97.
6. Palatnikov M. N., Sidorov N. V. Some Fundamental Points of Technology of Lithium Niobate and Lithium Tantalate Single Crystals. *Oxide Electronics and Functional Properties of Transition Metal Oxides*. 2014, ch. II, pp. 31–168.
7. Masloboeva S. M., Birjukova I. V., Palatnikov M. N., Tepljakova N. A. Poluchenie i issledovanie kristallov niobata litija, legirovannyh magniem i cinkom [Preparation and investigation of lithium niobate crystals doped with magnesium and zinc]. *Zhurnal neorganicheskoy himii* [Journal of Inorganic Chemistry], 2020, Vol. 65, No. 6, pp. 856–864. (In Russ.).
8. Van V. J. Quantum Dielectric Theory of Electronegativity in Covalent Systems. I. Electronic Dielectric Constant. *Physical Review*, 1969, Vol. 182, No. 3, pp. 891–905.
9. Levine B. F. d-Electron Effects on Bond Susceptibilities and Ionicities. *Physical Review B*, 1973, Vol. 7, No. 7, pp. 2591–2600.
10. Xue D., Betzler K., Hesse H. Chemical bond analysis of the second order nonlinear optical behavior of Zn-doped lithium niobate. *Optics Communications*, 2000, Vol. 182, pp. 167–173.
11. Xue D., Zhang S. Bond-charge calculation of nonlinear optical susceptibilities of LiXO₃ type complex crystals. *Chemical Physics*, 1998, Vol. 226, pp. 307–318.
12. Rietveld H. M. A Profile Refinement Method for Nuclear and Magnetic Structures. *Journal of Applied Crystallography*, 1969, Vol. 2, pp. 65–71.

Информация об авторах

А. В. Кадетова — технолог;

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

О. В. Токко — кандидат физико-математических наук, доцент;

А. И. Прусский — кандидат физико-математических наук, доцент.

Information about the authors

A. V. Kadetova — Engineer;

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

O. V. Tokko — PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor;

A. I. Prusskii — PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor.

Статья поступила в редакцию 06.02.2023; одобрена после рецензирования 13.02.2023; принята к публикации 14.02.2023.
The article was submitted 06.02.2023; approved after reviewing 13.02.2023; accepted for publication 14.02.2023.