

## ОСОБЕННОСТИ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ МОНОКРИСТАЛЛА $LiNbO_3:Cu$ (0,015 мас. %)

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/2023.15.215

**Аннотация:** С использованием метода прямого легирования расплава оксидом меди выращен композиционно однородный, легированный фотовольтаически активной примесью меди монокристалл  $LiNbO_3:Cu$  (0,015 мас. %). Методом фотоиндуцированного рассеяния света исследованы оптические свойства монокристалла. По интенсивности и величине угла раскрытия индикатрисы спекл-структуры фотоиндуцированного рассеяния света для исследованных кристаллов были рассчитаны величины диффузионного и фотовольтаического полей. Обнаружены значительные отличия в картинах фотоиндуцированного рассеяния света и в значениях фотоэлектрических параметров фотоиндуцированного рассеяния света номинально чистых кристаллов конгруэнтного и стехиометрического составов и кристалла  $LiNbO_3:Cu$  (0,015 мас. %). Показано, что при легировании конгруэнтного кристалла ниобата лития катионами меди в кристалле наблюдается возрастание величины диффузионного поля, уменьшение величины фотовольтаического поля и заметное уменьшение ширины запрещенной зоны. При этом для кристаллов конгруэнтного состава и  $LiNbO_3:Cu$  (0,015 мас. %), в отличие от кристалла стехиометрического состава, преимущественным механизмом фоторефракции остается фотовольтаический механизм. Данные фотоиндуцированного рассеяния света свидетельствуют о наличии в запрещенной зоне кристалла  $LiNbO_3:Cu$  (0,015 мас. %) высокой плотности мелких энергетических уровней, повышающих эффект фоторефракции и электропроводность кристалла.

*Ключевые слова:* ниобат лития, кристалл, дефекты, фоторефрактивные свойства, фотоэлектрические поля, ширина запрещенной зоны.

Высокосовершенные нелинейно-оптические фоторефрактивные монокристаллы ниобата лития ( $LiNbO_3$ ), легированные фотовольтаически активными примесями многозарядных катионов переходных металлов ( $Fe$ ,  $Cu$ ,  $Rh$ ,  $Mn$  и др.), перспективны для разработки материалов для голографической записи информации и когерентно-оптических систем обработки информации [1-4], для генерации терагерцового излучения [5], для создания компактных кристаллических ускорителей, реализующих генерацию электронных пучков и мягкого рентгеновского излучения [6]. В настоящее время в ряду катионов  $Fe$ ,  $Cu$ ,  $Rh$  и др. наименее всего изучено влияние катионов  $Cu$  на особенности структуры кристалла  $LiNbO_3$ , состояние ее дефектности, нелинейно-оптические и сегнетоэлектрические свойства. Большинство исследований (обзоры даны в работах [2, 3, 7, 8])

посвящено кристаллам  $LiNbO_3:Fe$ , как фоторефрактивным материалам для голографической записи информации. Однако при использовании кристаллов  $LiNbO_3:Cu$  открываются хорошие возможности для повышения интенсивности сигнала фотолюминесценции, а также для эффективного возбуждения инфракрасно-активных фононов кристаллической решетки ниобата лития [9]. Внедрение в структуру кристалла  $LiNbO_3$  многозарядных примесных центров  $Cu$  с электронными переходами в видимой области спектра позволяет также реализовать резонансное воздействие на фоторефрактивный кристалл возбуждающим излучением видимого диапазона.

Монокристалл  $LiNbO_3:Cu$  (0,015 мас.%) выращивался в воздушной атмосфере методом Чохральского с использованием ростовой установки Кристалл 2. Использовалась прямое легирование расплава оксидом меди. Для выращивания монокристаллов была использована гранулированная шихта, синтезированная в ИХТРЭМС КНЦ РАН. Состав шихты соответствовал составу конгруэнтного плавления (48,6 мол. %  $Li_2O$ ). Для уменьшения широко развитой доменной и дефектной структуры исследованный в данной работе кристалл  $LiNbO_3:Cu$  (0,015 мас.%) был подвергнут послеростовой термической и электротермической обработке. Высокотемпературный электродиффузионный отжиг снижает также концентрацию различных дефектов в кристалле. Контроль степени монодоменизации выращенных кристаллов осуществлялся пьезоакустическим методом, основанным на определении частотной характеристики электрического импеданса образца, и путем определения величины статического пьезомодуля кристаллической були при приложении механического напряжения вдоль полярной оси (прямой пьезоэффект). Концентрация легирующей добавки меди и следовых количеств посторонних примесей в торце, в основной части були и в конусе монокристаллической були определялась методами атомно-эмиссионной спектроскопии (спектрометр ICPS 9000 фирмы Shimadzu). Содержание следовых количеств примесей (мас. %) в шихте в конусе и торце були приведено в Таблице 1.

Таблица 1. Примесный состав (С, мас. %) гранулированной шихты ниобата лития, а также конусной и торцевой частей кристалла  $LiNbO_3:Cu$  (0,015 мас.%).

Определяемые элементы		<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>Al</i>	<i>Fe</i>	<i>Cr, Cu, V</i>	<i>Pb, Sn</i>	<i>Bi</i>	<i>Mg</i>	<i>Si, Ti, Mo, Ca, Co</i>	<i>Sb</i>	<i>Zr</i>
$C \cdot 10^{-3}$ , мас. %	Шихта	<0,2	<0,3	<0,3	<0,3	0,3	<0,5	0,5	0,50	1	2,1	<10
	Конус	<0,2	<0,3	<0,3	0,32	0,3	<0,5	0,5	0,53	1	1,7	10
	Торец	<0,2	<0,3	1,0	0,38	0,3	<0,5	0,5	0,58	1	2,0	10

Фоторефрактивные катионы меди могут присутствовать в структуре кристалла  $LiNbO_3$  в нескольких зарядовых состояниях, способствуют образованию как глубоких, так и мелких локализованных уровней энергии в запрещенной зоне, существенно влияют на особенности кристаллического поля, композиционную и оптическую однородность кристалла, эффект фоторефракции [2-4, 7].

Для исследованных кристаллов была определена ширина запрещенной зоны по формуле:

$$\Delta E_g = hc / \lambda_K, \quad (1)$$

где  $\lambda_K$  – длина волны, соответствующая краю фундаментального поглощения, определенная для исследованных кристаллов в [10],  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света в вакууме.

Результаты расчетов приведены в Таблице 2. Ширина запрещенной зоны для кристалла  $LiNbO_3 : Cu$  (0,015 мас.%) составила 3,08 эВ. При этом точность определения границы края фундаментального поглощения составляла  $\pm 1,0$  нм. Для сравнения номинально чистый кристалл  $LiNbO_{3конгр}$  имеет ширину запрещенной зоны 3,72 эВ, а номинально чистый стехиометрический кристалл  $LiNbO_{3стех}$  3,48 эВ. Меньшее значение ширины запрещенной зоны в кристалле  $LiNbO_3 : Cu$  (0,015 мас.%) свидетельствует о наличии в этом кристалле более высокой плотности мелких энергетических уровней («уровней прилипания») в запрещенной зоне, повышающих эффект фоторефракции и электропроводность кристалла.

Таблица 2. Фотоэлектрические параметры ФИРС в кристаллах  $LiNbO_3$  разного состава.

Кристалл	$\lambda_K$ , нм	$\Delta E_g$ , эВ	$\theta$ , °	$E_{pv}$ , В/см	$E_d$ , В/см
$LiNbO_3 : Cu$ (0,015 мас.%)	399,3	3,08	34	1055	172
$LiNbO_{3конгр}$	334,2	3,72	-	5620	104
$LiNbO_{3стех}$	360,0	3,48	56	3178	1360

Эффект фоторефракции оценивался методом фотоиндуцированного рассеяния света [8, 10]. В экспериментах по ФИРС использовался лазер MLL-100 на иттрий-алюминевом гранате с длиной волны 532 нм, установка описана в [10]. На рис. 1 показаны изменения вида индикатрисы спекл-структуры ФИРС в зависимости от времени при мощности возбуждающего лазерного излучения в 160 мВт. Видно, что в первую секунду облучения сначала появляется трехслойная спекл-структура в виде деформированной окружности с малым углом раскрытия индикатрисы (см. рис. 1). При этом центральный слой окружности (лазерное пятно) представляет собой яркое и наиболее интенсивное пятно,

второй слой имеет меньшую интенсивность свечения, и крайний по периметру третий слой имеет точечную спекл-структуру (см. рис. 1). Из рис. 1 видно, что центральное лазерное пятно и вся спекл-структура индикатрисы ФИРС в течение 360 секунд облучения принимает форму овала, ориентированного в направлении полярной оси кристалла. Данные фотоиндуцированного рассеяния света указывают на наличие эффекта фоторефракции в кристаллах  $LiNbO_3:Cu$  (0,015 мас.%) и  $LiNbO_{3смex}$ .

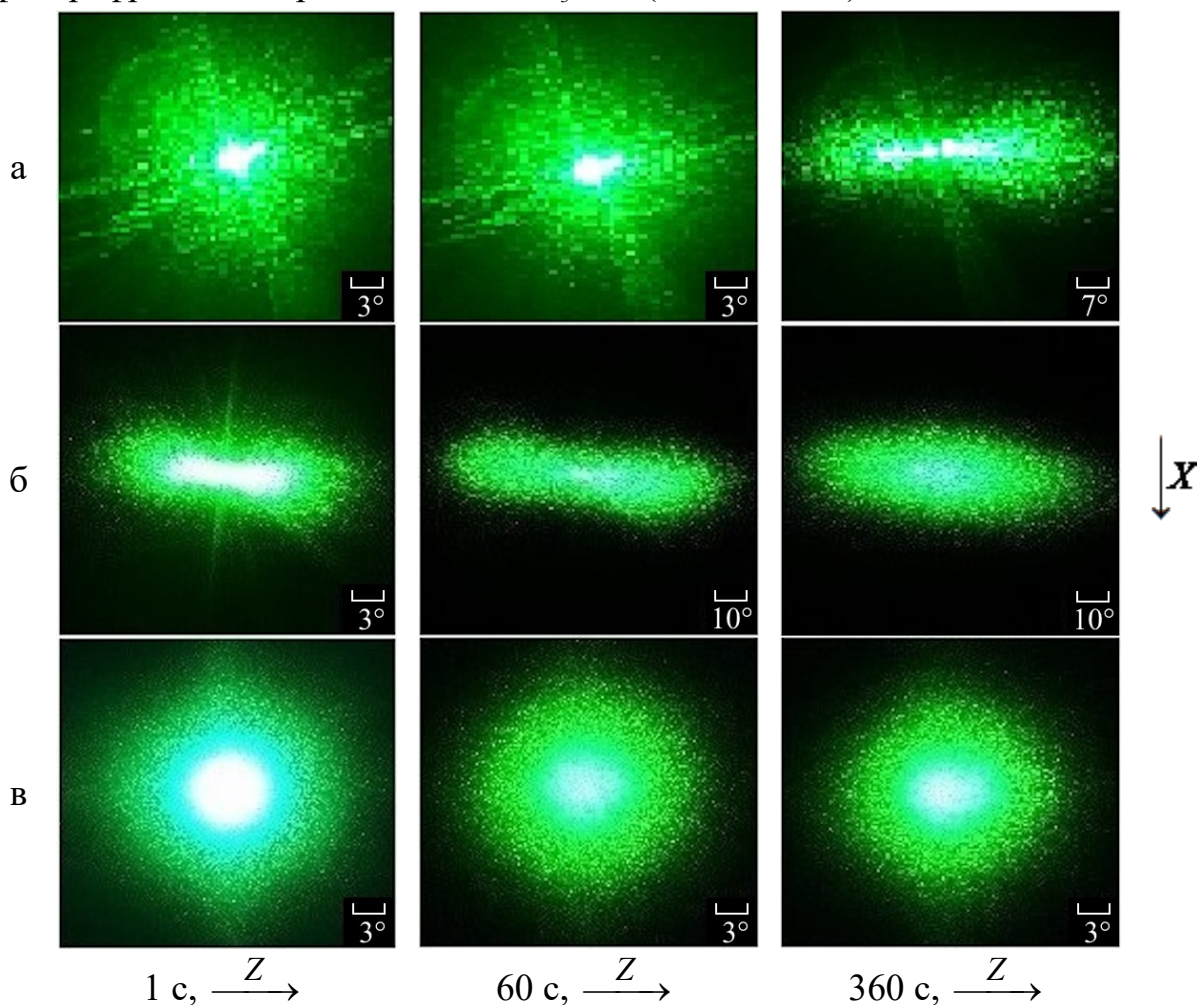


Рис. 1. Зависимость вида индикатрисы спекл-структуры фотоиндуцированного рассеяния света в кристаллах: а –  $LiNbO_3:Cu$  (0,0015 мас.%); б –  $LiNbO_{3смex}$ ; в –  $LiNbO_{3конгр}$  от времени при мощности излучения 160 мВт,  $\lambda_o = 532$  нм. Волновой вектор возбуждающего лазерного излучения направлен вдоль оси  $Y$ , по нормали к входной грани кристалла, вектор напряженности электрического поля лазерного излучения  $E$  параллелен полярной оси  $Z$  кристалла.

Расчёт угла раскрытия  $\theta$  индикатрисы спекл-структуры ФИРС производили по формуле:

$$\theta = \arctg(a/b), \quad (2)$$

где  $a$  – геометрический размер индикатрисы ФИРС,  $b$  – расстояние от

кристалла до крайней освящённой точки на экране [10].

Данные расчета угла раскрытия  $\theta$  приведены в Таблице 2. Для конгруэнтного кристалла при данной мощности лазерного излучения раскрытия индикатрисы ФИРС не происходит, наблюдается только круговое рассеяние на статических структурных дефектах (см. рис. 1). В кристалле  $LiNbO_3:Cu$  (0,015 мас.%) угол раскрытия индикатрисы ФИРС меньше, чем в стехиометрическом кристалле (см. Таблицу 2).

По интенсивности и величине угла раскрытия  $\theta$  индикатрисы спекл-структуры ФИРС, используя подход, сформулированный в работе [11], для исследованных кристаллов были рассчитаны величины диффузионного  $E_d$  и фотовольтаического  $E_{pv}$  полей. Исследуемый кристалл устанавливался так, чтобы направление полярной оси кристалла совпадало с направлением поляризации возбуждающего лазерного излучения. При такой геометрии эксперимента рассеянное излучение представляет собой по форме «восьмерку» (ФИРС присутствует) или круглое пятно (ФИРС отсутствует). Фотодиод располагается таким образом, чтобы была возможность изменять его положение в плоскости падения рассеянного кристаллом излучения для измерения угла раскрытия индикатрисы и интенсивности рассеянного излучения при разных углах. Отрицательный и положительный углы соответствуют отрицательному и положительному направлениям полярной оси кристалла. Устройство экспериментальной установки позволяет изменять положение фотодиода (точность перемещения  $0,5^\circ$ ) в горизонтальной плоскости в пределах от  $-51$  до  $+51^\circ$ . В процессе эксперимента изменяют положение фотодиода от центральной области картины рассеяния с шагом в  $3^\circ$  к положительному и отрицательному направлениям, фиксируя показания мультиметра, установленного в режиме амперметра. Каждое измерение интенсивности ФИРС при заданном угле  $\theta$  делалось приблизительно через 10 минут после начала облучения кристалла лазерным излучением, когда временные изменения картины ФИРС уже отсутствовали, а картина становилась стационарной. В начале эксперимента фотодиод устанавливался в центральное положение ( $0^\circ$ ), т.е. в точку, соответствующую центральной области картины рассеяния. Более подробно схема экспериментальной установки для определения фотополей описана в [10].

Результаты расчёта значений фотоэлектрических полей исследованных кристаллов ниобата лития приведены в Таблице 2.

Таким образом, из представленных данных видно, что при легировании конгруэнтного кристалла ниобата лития катионами меди в кристалле наблюдается возрастание величины диффузионного поля  $E_d$  от 104 до 172 В/см, уменьшение фотовольтаического поля и заметное

уменьшение ширины запрещённой зоны (см. Таблицу 2). При этом для кристаллов конгруэнтного состава и  $LiNbO_3 : Cu$  (0,015 мас.%), в отличие от кристалла  $LiNbO_{3стех}$  преимущественным механизмом фоторефракции остается фотовольтаический механизм, поскольку величина фотофольтаического поля существенно больше величины диффузионного поля. Необходимо отметить, что число глубоких и мелких ловушек электронов, обусловленных неконтролируемыми (следовыми) количествами многочисленных примесных катионов, которые помимо катионов  $Cu$  также влияют на эффект фоторефракции и фотоиндуцированное рассеяние света, во всех исследованных кристаллов одинаково, поскольку для выращивания монокристаллов использовалась одна и та же гранулированная шихта ТУ с одинаковым составом и концентрацией следовых примесей металлов. Данные фотоиндуцированного рассеяния света свидетельствуют также о наличии в запрещенной зоне кристалла  $LiNbO_3 : Cu$  (0,015 мас.%) высокой плотности мелких энергетических уровней, обусловленных мелкими ловушками электронов в виде дефектов  $V_{Li}$ ,  $V_{Nb}$ ,  $V_{Cu}$  и др., вносящих свой вклад в диффузионные фотоэлектрические поля [10, 11], определяющие особенности спекл-структуры и величину угла  $\theta$  и динамику раскрытия индикатрисы ФИРС кристаллов  $LiNbO_3$  разного состава. Однако, величина диффузионного поля в кристалле  $LiNbO_3 : Cu$  (0,015 мас.%) и угол раскрытия индикатрисы ФИРС значительно меньше, чем в кристалле  $LiNbO_{3стех}$ , что указывает на уменьшение количества мелких энергетических уровней («уровней прилипания») в запрещенной зоне, повышающих эффект фоторефракции и электропроводность кристалла.

#### Библиографический список:

1. **Buse, K.** Infrared holographic recording in  $LiNbO_3 : Cu$  / K. Buse, F. Jermann, E. Krätzig. // Applied Physics A. – 1994. – V. 58. – I. 3. – P. 191-195. DOI: 10.1007/BF00324375.
2. **Теплякова, Н.А.** Дефектная структура и фоторефрактивные свойства кристаллов двойного легирования  $LiNbO_3 : Mg : Fe$  и  $LiNbO_3 : Zn : Fe$  / Н.А. Теплякова, Н.В. Сидоров, М.Н. Палатников // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2018. – Вып. 10. – С. 628-635. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.628.
3. **Arizmendi, L.** Photonic applications of lithium niobate crystals / L. Arizmendi // Physica Status Solidi (A). 2004. – V. 201. – I. 2. – P. 253-283. DOI: 10.1002/pssa.200303911.
4. **Gunter, P.** Photorefractive materials and their applications. 1 Basic effects / P. Günter, J.-P. Huignard // In: Springer Series in Optical Sciences. – New York: Springer, 2006. – V. 113. – P. 1-5. 10.1007/0-387-25192-8\_1.
5. **Wang, Y.** Terahertz generation from Cu ion implantation into lithium niobate / Y. Wang, R. Wang, J. Yuan et al. // Journal of Luminescence. – 2014. – V. 147. – P. 242-244. DOI: 10.1016/j.jlumin.2013.11.032.
6. **Kukhtarev, N.V.** Pyroelectric and photogalvanic crystal accelerators / N.V. Kukhtarev, T.V. Kukhtereva, G. Stargell et al. // Journal of Applied Physics. – 2009. – V. 106. – I. 1. – P. 014111-1-04111-7. DOI: 10.1063/1.3159903.
7. **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.
8. **Максименко, В.А.** Фотоиндуцированные процессы в кристаллах ниобата лития / В.А. Максименко, А.В. Суй, Ю.М. Карпец. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 96 с.

9. Горелик, В.С. Оптические свойства кристаллов ниобата лития, легированных ионами меди / В.С. Горелик, М.Н. Палатников, А.Ю. Пятышев и др. // Неорганические материалы. – 2018. – Т. 54. – № 10. – С. 1071-1078. DOI: 10.1134/S0002337X1810007X.
10. Сидоров, Н.В. Лазерная коноскопия и фотоиндуцированное рассеяние света в исследованиях свойств нелинейно-оптического кристалла ниобата лития / Н.В. Сидоров, О.Ю. Пикуль, Н.А. Теплякова, М.Н. Палатников. – М.: РАН, 2019. – 350 с.
11. Goulikov, M. Photorefractive parameters of lithium niobate crystals from photoinduced light scattering / M. Goulikov, M. Imlau, Th. Woike // Physical Review B. – 2008. – V. 77. – I. 23. – P. 235110-1-235110-7. DOI: 10.1103/PhysRevB.77.235110.

#### References:

1. Buse K., Jermann F., Krätzig E. Infrared holographic recording in LiNbO<sub>3</sub>:Cu, *Applied Physics A*, 1994, vol. 58, issue 3, pp. 191-195. DOI: 10.1007/BF00324375.
2. Teplyakova N.A., Sidorov N.V., Palatnikov M.N. Defektnaya struktura i fotorefraktivnye svoystva kristallov dvojnogo legirovaniya LiNbO<sub>3</sub>:Mg:Fe i LiNbO<sub>3</sub>:Zn:Fe [Defective structure and photorefractive properties of double doped crystals LiNbO<sub>3</sub>:Fe:Mg and LiNbO<sub>3</sub>:Fe:Zn], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2018, issue 10, pp. 628-635. (In Russian). DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.628.
3. Arizmendi L. Photonic applications of lithium niobate crystals, *Physica Status Solidi (A)*, 2004, vol. 201, issue 2, pp. 253-283. DOI: 10.1002/pssa.200303911.
4. Gunter P., Huignard J.-P. Photorefractive materials and their applications. 1 Basic effects, Springer Series in Optical Sciences. New York, Springer, 2006, vol. 113, pp. 1-5. DOI: 10.1002/pssa.200303911.
5. Wang Y., Wang R., Yuan J. et al. Terahertz generation from Cu ion implantation into lithium niobate, *Journal of Luminescence*, 2014, vol. 147, pp. 242-244. DOI: 10.1016/j.jlumin.2013.11.032.
6. Kukhtarev N.V., Kukhtereva T.V., Stargell G. et al. Pyroelectric and photogalvanic crystal accelerators, *Journal of Applied Physics*, 2009, vol. 106, issue 1, pp. 014111-1-04111-7. DOI: 10.1063/1.3159903.
7. Volk T., Wohlecke M. *Lithium niobate. Defects, photorefraction and ferroelectric switching*. Berlin, Springer, 2008, 250 p. DOI: 10.1007/978-3-540-70766-0.
8. Maksimenko V.A., Syuy A.V., Karpets Yu.M. *Fotoindutsirovannyye protsessy v kristallakh niobata litiya* [Photoinduced processes in lithium niobate crystals]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, 96 p. (In Russian).
9. Gorelik V.S., Skrabatun A.V., Pyatyshev A.Yu. et al. Optical properties of copper-doped lithium niobate crystals, *Inorganic Materials*, 2018, vol. 54, issue 10, pp. 1013-1020. DOI: 10.1134/S0020168518100072.
10. Sidorov N.V., Pikoul O.Y., Teplyakova N.A., Palatnikov M.N. *Lazernaya konoskopiya i fotoindutsirovannoe rasseyaniye sveta v issledovaniyakh svoystv 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).
11. Goulikov M., Imlau M., Woike Th. Photorefractive parameters of lithium niobate crystals from photoinduced light scattering, *Physical Review B*, 2008, vol. 77, issue 23, pp. 235110-1-235110-7. DOI: 10.1103/PhysRevB.77.235110.

*Short Communication*

#### FEATURES OF THE DEFECT STRUCTURE OF A LiNbO<sub>3</sub>:Cu(0.015 WT.%) SINGLE CRYSTAL

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/2023.15.215

**Abstract:** By direct alloying of melt with copper oxide, a compositionally uniformity LiNbO<sub>3</sub>:Cu (0,015 wt%) single crystal doped with a photovoltaically active copper dopant has been grown. The optical properties of the single crystal have been studied by photoinduced light scattering. The values of the diffusion and photovoltaic fields were calculated for the studied crystals based on the intensity and magnitude of the opening angle of the speckle structure of the photoinduced light scattering. Significant differences in the photoinduced light scattering patterns and in the values of the photoinduced light scattering photoelectric parameters of nominally pure crystals of congruent and stoichiometric compositions and a LiNbO<sub>3</sub>:Cu (0,015 wt%) crystal have been found. It has been

established that when a congruent lithium niobate crystal is doped with copper cations, the diffusion field increases, the photovoltaic field decreases, and the band gap in the crystal decreases noticeably. In contrast to the crystal of stoichiometric compositions, the photovoltaic mechanism remains the predominant mechanism of photorefractive for crystals of congruent composition and  $LiNbO_3:Cu$  (0,015 wt%). Photoinduced light scattering data indicate the presence of a  $LiNbO_3:Cu$  (0,015 wt.%) crystal in the band gap high density of small energy levels that increase the effect of photorefractive and electrical conductivity of the crystal.

*Keywords: lithium niobate, crystal, defects, photorefractive properties, photovoltaic fields, band gap.*

*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: 16.06.2023; после рецензирования/revise: 10.07.2023; принята/accepted: 17.07.2023.