

УДК 546.34.882.4.535.361

ПОРОГОВЫЕ ЭФФЕКТЫ И АНОМАЛИИ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В КРИСТАЛЛАХ $\text{LiNbO}_3\text{:ZnO}$

© 2019 г. М. Н. Палатников¹*, Н. В. Сидоров¹, О. В. Макарова¹, А. В. Кадетова¹,
Л. А. Алешина², С. Л. Панасюк³, И. В. Юдин³, Е. В. Иванова⁴, М. В. Заморянская⁴

¹Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева
Российской академии наук, Россия, 184209 Мурманская обл., Апатиты, Академгородок, 26а

²Петрозаводский государственный университет,
Россия, 185910 Республика Карелия, Петрозаводск, ул. Университетская, 10а

³Санкт-Петербургский государственный технологический институт,
Россия, 190013 Санкт-Петербург, Московский пр., 26

⁴Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
Россия, 194021 Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

*e-mail: palat_mn@chemy.kolasc.net.ru

Поступила в редакцию 08.05.2018 г.

После доработки 21.11.2018 г.

Принята к публикации 21.12.2018 г.

Исследованы структурные, оптические характеристики и радиационная стойкость кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:ZnO}$ ($[\text{ZnO}] \sim 0.15\text{--}5.9$ мол. % в кристалле). Показана взаимосвязь аномалий концентрационных зависимостей структурных, оптических характеристик и радиационной стойкости с пороговыми эффектами в кристаллах $\text{LiNbO}_3\text{:ZnO}$. Подтверждено наличие и уточнено положение двух концентрационных порогов: в области низких (~ 1.17 мол. % ZnO в кристалле) и средних концентраций примеси (~ 4.8 мол. % ZnO в кристалле). Существенно уточнена концентрационная зависимость структурных параметров кристаллов в области основного концентрационного порога (~ 6.8 мол. % ZnO в расплаве).

Ключевые слова: ниобат лития, легирование, β - и γ -облучение, пороговые эффекты, оптическое пропускание, катодолюминесценция, радиационная стойкость

DOI: 10.1134/S0002337X19060113

ВВЕДЕНИЕ

Поиск стойких к оптическому повреждению материалов отражен, в частности, в публикациях, посвященных исследованиям легированных кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:ZnO}$ [1–7]. Влияние концентрации легирующего элемента на свойства кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:ZnO}$ носит скачкообразный характер [1, 3, 5–7], что определяется термином концентрационный порог (КП). КП в кристаллах $\text{LiNbO}_3\text{:ZnO}$ больше одного [3, 5–7]. Основной КП располагается вблизи ~ 6.8 мол. % ZnO в расплаве [5–7]. В области этого КП наблюдается радикальное изменение физико-химических характеристик расплава и сильное снижение фото-рефракции в кристаллах $\text{LiNbO}_3\text{:ZnO}$.

В условиях воздействия ионизирующего излучения (ИИ) при захвате носителей заряда (электронов) собственными и примесными дефектами решетки образуются центры окраски (заряженные дефекты), вносящие вклад в оптическое поглощение [8–10]. То есть, воздействие ИИ приво-

дит к перестройке электронной подсистемы кристалла при возбуждении вторичных электронов, приводящих к образованию заряженных точечных дефектов. В работе [10] изучено влияние легирования катионами Zn^{2+} , вносящими изменения в электронную подсистему кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:ZnO}$, на их радиационную стойкость. Для ниобата лития перестройка собственной дефектной структуры под воздействием ИИ заключается, главным образом, в неравновесной перезарядке ионов переходных металлов (например, $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$) и образовании поляронов на основе антиструктурных дефектов Nb_{Li} [11]. Сама возможность перезарядки ионов переходных металлов и концентрация антиструктурных дефектов Nb_{Li} определяются характером дефектной структуры кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:ZnO}$ и, соответственно, концентрацией легирующей примеси [6, 10]. Таким образом, в области КП наблюдается не только существенная перестройка структурных характеристик, но и значительные изменения в элек-

тронной подсистеме кристалла, что отражается на изменении оптической и радиационной стойкости.

В настоящей работе с использованием оптической спектроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС), катодолюминесценции (КЛ), полнопрофильного анализа рентгенограмм (ППАР) исследована взаимосвязь концентрационных аномалий различных физических характеристик и положения КП, обусловленных перестройкой структуры и электронной подсистемы кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$. Методом ППАР, КЛ и при исследовании радиационной стойкости кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ подтверждено наличие и уточнены положения КП в области низких (~ 1.17 мол. % ZnO в кристалле) и средних концентраций примеси (~ 4.8 мол. % ZnO в кристалле), а также основного КП вблизи ~ 6.8 мол. % ZnO в расплаве.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Методы синтеза шихты, выращивания и монокристаллизации кристаллов ниобата лития конгруэнтного ($\text{LiNbO}_{3\text{конгр}}$), стехиометрического составов ($\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$), а также кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ подробно описаны в работе [7].

Для исследования спектров КРС, КЛ и пропускания из кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ вырезались образцы в виде параллелепипедов размерами $\sim 6 \times 7 \times 8$ мм.

Кристаллы $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ облучали при комнатной температуре на источнике β -излучения с радионуклидами $\text{Sr-90}+\text{Y-90}$ типа БИС-20 и на установке МРХ- γ -20 от источника ^{60}Co . Подробно условия облучения, методы измерения поглощенной дозы и исследования оптических спектров на спектрофотометре Specord M40 описаны в [10]. При исследовании кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ методами КЛ образцы были впаяны в сплав Розе. На поверхность образцов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ напылялся углерод для улучшения поверхностной проводимости. Спектры КЛ были получены при энергии электронов 15 кэВ и токе электронного пучка ~ 50 нА. Диаметр электронного пучка составлял ~ 50 мкм. Погрешность определения интенсивности КЛ составляла $\sim 5\%$.

Спектры КРС возбуждались линией 514.5 нм аргонового лазера Spectra Physics (модель 2018-RM) и регистрировались спектрографом Т64000 производства фирмы Horiba Jobin Yvon с использованием конфокального микроскопа. Мощность возбуждающего лазерного излучения на образце не превышала 3 мВт. Все спектры регистрировались с разрешением 1.0 см^{-1} . Обработка спектров и разделение близко лежащих линий (например, линий 240 и 268 см^{-1}) проводились с использова-

нием пакета программ Horiba Lab Spec 5.0 и Origin 8.1. Точность определения частот, ширины и интенсивностей линий ± 1.0 , $\pm 3.0 \text{ см}^{-1}$ и 5% соответственно [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее в работах [5–7] при исследовании условий кристаллизации $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ было уточнено значение основного КП (6.76 мол. % ZnO в расплаве) и сделано предположение о существовании еще одного КП при ~ 5.38 мол. % ZnO в расплаве, где свойства системы расплав–кристалл меняются не так существенно.

Возможность существования еще одного КП при сравнительно малых концентрациях ZnO была предсказана при исследовании спектров КРС кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ с концентрацией легирующей добавки < 1.6 мол. % [4]. При этом наблюдалась область повышенного упорядочения структуры, когда в катионной подрешетке повышен порядок чередования основных, примесных катионов и вакансий вдоль полярной оси, что сопровождается уменьшением ширины линий спектра КРС. Так, на рис. 1 приведены ширины линий спектра КРС кристаллов $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$, $\text{LiNbO}_{3\text{конгр}}$, $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ ($[\text{ZnO}] \approx 0\text{--}1.6$ мол. % в кристалле) в геометриях рассеяния $Y(ZX)\bar{Y}$ и $Y(ZZ)\bar{Y}$ (активны соответственно фундаментальные фононы $E(TO)$ и $A_1(TO)$ типов симметрии [12]). Ширины всех линий минимальны в спектре кристалла стехиометрического состава $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$, обладающего наиболее упорядоченной катионной подрешеткой, и существенно возрастают для кристалла $\text{LiNbO}_{3\text{конгр}}$. Концентрационные зависимости ширины многих линий в спектре кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$, выращенных из расплава конгруэнтного состава, уменьшаются в области концентраций примеси $\sim 0.15\text{--}1.17$ мол. % по сравнению с ширинами линий кристалла $\text{LiNbO}_{3\text{конгр}}$ (рис. 1). С увеличением концентрации ZnO в кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ ширины некоторых линий изменяются нелинейно: в области концентраций от ~ 0.15 до $1.0\text{--}1.17$ мол. % ZnO они уменьшаются, а затем, в области концентраций $\sim > 1.0\text{--}1.17$ мол. % ZnO , ширины одних линий возрастают, а других остаются практически неизменными (рис. 1). Минимум особенно явно выражен для концентрационных зависимостей ширины линий с частотами 156 , 240 , 268 , 371 , 434 , 576 и 876 см^{-1} ($E(TO)$) и 240 , 268 см^{-1} ($A_1(TO)$), соответствующих колебаниям катионов Nb^{5+} и Li^+ в кислородных октаэдрах и внутренним колебаниям кислородных октаэдров. На основе данных КРС трудно установить точное положение КП в области малых концентраций. В то же время, уменьшение ширины линий с частотами 240 и 268 см^{-1} ($A_1(TO)$), соответствующих пол-

носимметричным колебаниям ионов Nb^{5+} и Li^+ вдоль полярной оси, однозначно свидетельствует об упорядочении катионной подрешетки кристалла ниобата лития вдоль полярной оси в этой области концентраций примеси (рис. 1). При этом кислородные октаэдры становятся более совершенными, о чем свидетельствует уменьшение ширины линии с частотой 626 см^{-1} , соответствующей полносимметричным $A_1(TO)$ -колебаниям кислородных октаэдров (рис. 1). Таким образом, в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ в диапазоне сравнительно малых концентраций примеси (от ~ 0.15 до 1.0 – 1.17 мол. % ZnO) существует область повышенного упорядочения структуры. При концентрациях $\sim 1.17 < [\text{ZnO}] < 1.6$ мол. % имеется тенденция к увеличению ширин многих линий спектра КРС, что свидетельствует о разупорядочении структуры (рис. 1). То есть в области концентраций 0.15 – 1.6 мол. % ZnO в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ происходит структурная перестройка.

Ранее в работе [9] были уточнены механизмы образования точечных и электронных дефектов в кристалле LiNbO_3 , предложена модель, описывающая процессы, происходящие под воздействием ИИ, выявлена роль дефектов кислородной подрешетки в процессе образования и отжига радиационной окраски. В работе [10] показано, что процессы перестройки структуры в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$, обуславливающие повышение оптической и радиационной стойкости кристаллов при легировании, тесно взаимосвязаны. Кроме того, установлено, что изменение оптического пропускания (поглощения) кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ при β - и γ -облучении существенно и немонотонно зависит от концентрации легирующей примеси [10]. При этом увеличение оптического поглощения при облучении ИИ происходит в широкой области длин волн ~ 350 – 700 нм с максимальным изменением вблизи ~ 400 нм [10]. После обработки данных исследования зависимостей оптической плотности от дозы облучения ИИ (рис. 2), характеризующих радиационную стойкость существенно более широкого круга кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ по сравнению с набором кристаллов, изученных в работе [10], были получены зависимости дозы насыщения радиационной окраски и уменьшения пропускания ΔT облученных ИИ кристаллов от концентрации ZnO , позволяющие подтвердить наличие и уточнить положение КП в области малых и средних концентраций примеси (рис. 3). На рис. 2 хорошо видно, что дозы насыщения радиационной окраски для кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ в области сравнительно малых концентраций примеси ($[\text{ZnO}] < 1.6$ мол. %) могут различаться на порядки.

Выраженные аномалии на зависимостях дозы насыщения радиационной окраски и уменьшения пропускания ΔT облученных ИИ кристаллов

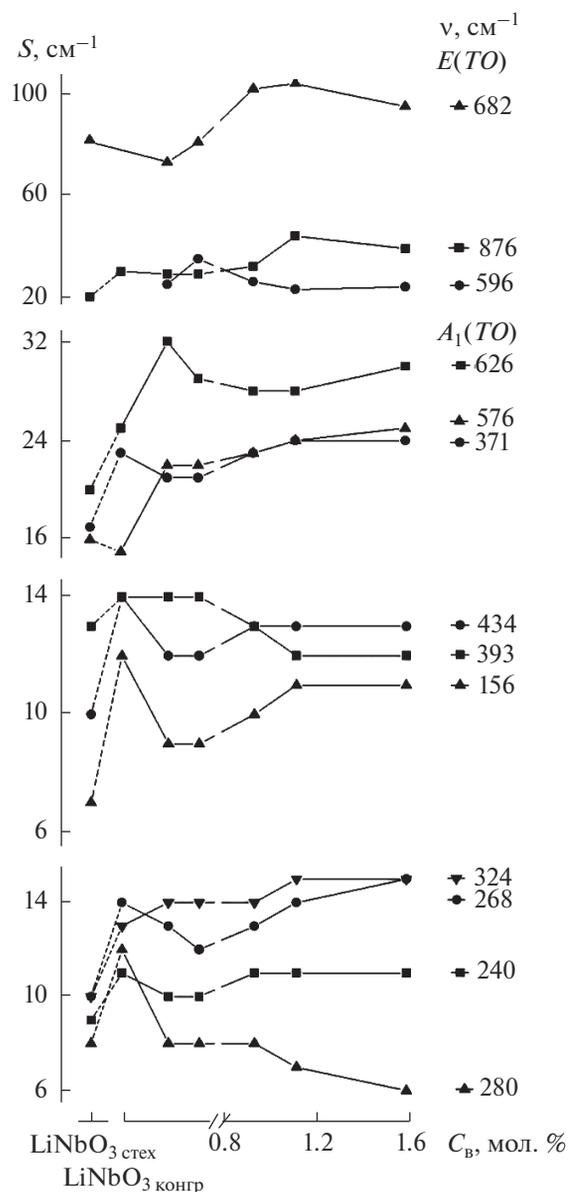


Рис. 1. Зависимости ширин линий в спектрах КРС кристаллов LiNbO_3 стех, LiNbO_3 конгр и кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ от концентрации ZnO в кристалле (C_b) (пунктиром обозначено изменение ширин линий при переходе от кристалла LiNbO_3 стех к кристаллу LiNbO_3 конгр).

$\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ от концентрации примеси, непосредственно характеризующих радиационную стойкость кристаллов, показывают, что КП в области малых и средних концентраций примеси обусловлены, главным образом, изменением их электронной подсистемы. Первый концентрационный порог выражен несколько менее четко и располагается, по-видимому, вблизи $C_b \approx 1.17$ мол. % (рис. 3). Положение второго КП можно определить гораздо более точно, поскольку в области

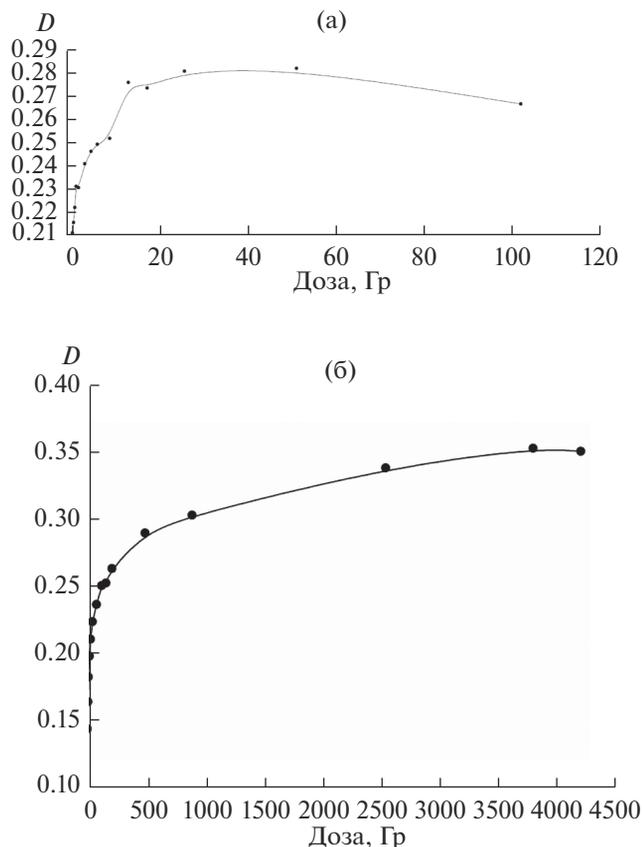


Рис. 2. Зависимости оптической плотности от дозы β -облучения кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:ZnO}$: $[\text{ZnO}]$ в верхней части кристалла ($C_B \approx 0.15$ (а), ≈ 1.17 мол. % (б)).

средних концентраций (область второго КП) кристаллы $\text{LiNbO}_3\text{:ZnO}$ были изучены со сравнительно малым концентрационным шагом (~ 0.2 мол. % ZnO) (рис. 3). Этот КП располагается вблизи концентрации $[\text{ZnO}] \approx 4.8$ мол. % в кристалле ($[\text{ZnO}] \approx 6.3$ мол. % в расплаве), что существенно выше ($[\text{ZnO}] \approx 4.0$ мол. % в кристалле или ≈ 5.4 мол. % в расплаве), чем было показано в работах [5–7], где исследовались физико-химические свойства системы кристалл–расплав.

По-видимому, это вызвано тем, что, во-первых, в отличие от физико-химических свойств радиационная стойкость кристаллов непосредственно связана с электронной подсистемой кристалла, а во-вторых, изучение физико-химических характеристик в работах [5–7] в области средних концентраций проводилось с гораздо большим концентрационным шагом. КП в области средних концентраций примеси ($[\text{ZnO}] \approx 4.8$ мол. % в кристалле или $[\text{ZnO}] \approx 6.3$ мол. % в расплаве) слабо проявляется на концентрационных зависимостях физико-химических свойств [5–7] и практически не проявляется на зависимостях структурных характеристик [6, 7] (табл. 1, рис. 4 и 5). Но поскольку этот КП обусловлен, по-видимому, пере-

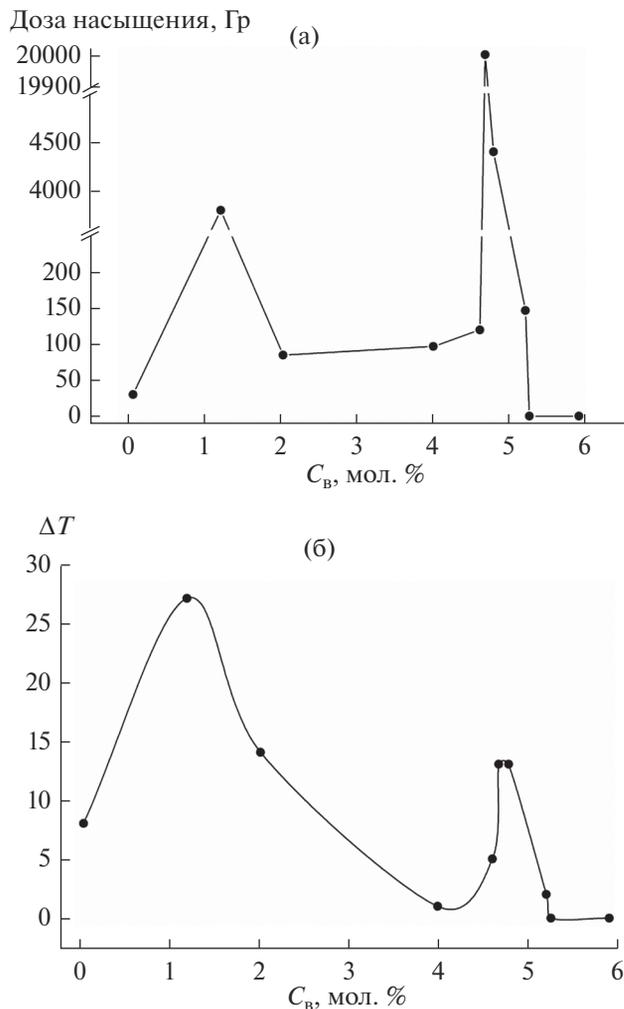


Рис. 3. Зависимости дозы насыщения радиационной окраски (а) и уменьшения пропускания ΔT (б) облученных β - и γ -излучением кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:ZnO}$ от концентрации примеси.

стройкой главным образом электронной подсистемы кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:ZnO}$, он отчетливо наблюдается при исследовании радиационной стойкости и КЛ (рис. 3 и 6). Так, интенсивность КЛ кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:ZnO}$ с малыми концентрациями примеси почти на два порядка меньше, чем интенсивность КЛ кристаллов с концентрацией примеси $\sim >4$ мол. % ZnO в кристалле, а на концентрационных зависимостях интенсивности КЛ в области второго КП ($[\text{ZnO}] \approx 4.8$ мол. % в кристалле) наблюдается резкая аномалия (рис. 6).

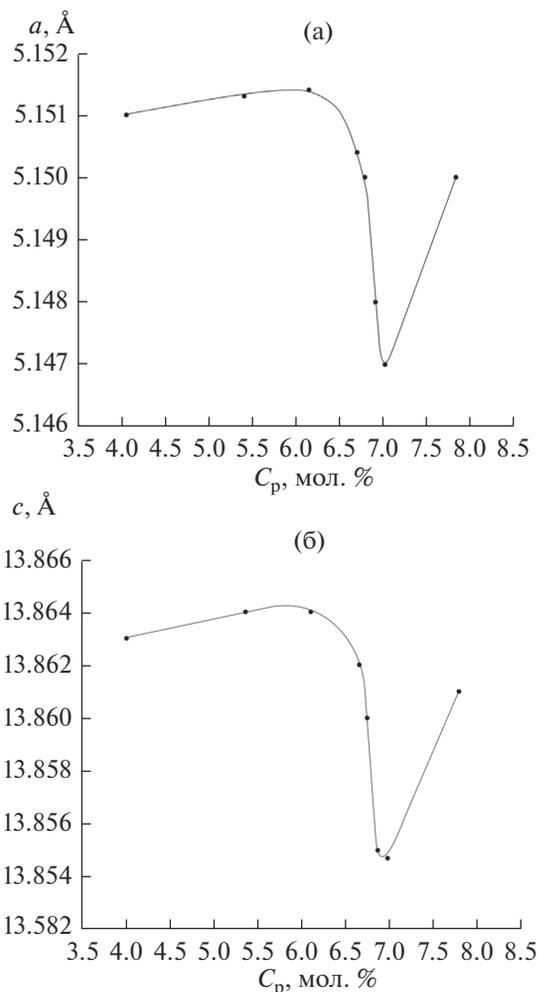
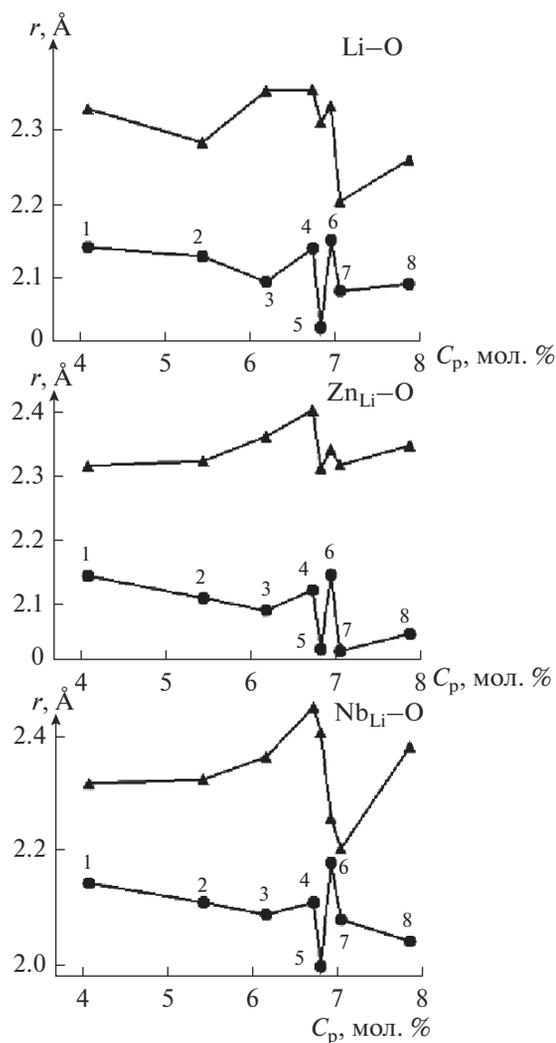
Совершенно очевидно, что эта аномалия связана с перестройкой электронной подсистемы кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:ZnO}$ при изменении механизма вхождения примеси в его структуру. Так, в работе [13] установлено, что нефоторефрактивные примеси (например, катионы Mg^{2+} и Zn^{2+}) в ниобате лития могут образовывать мелкие электрон-

Таблица 1. Периоды элементарной ячейки кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$, концентрации ZnO в расплаве и верхней части кристаллов в области средних и высоких концентраций примеси

Образец	1	2	3	4	5	6	7	8
a , Å	5.151(0)	5.151(4)	5.151(5)	5.150(4)	5.150(0)	5.148(7)	5.147(9)	5.150(3)
c , Å	13.863(3)	13.864(9)	13.864(4)	13.862(0)	13.860(0)	13.855(1)	13.854(7)	13.861(4)
C_p , мол. %	4.03	5.38	6.12	6.67	6.76	6.88	6.99	7.8
C_B , мол. %	3.43	3.95	4.54	5.07	5.19	4.68	4.76	5.19

ные ловушки, способствующие повышению эффективности излучательной рекомбинации фотовозбужденных носителей без их захвата на глубокие уровни, что значительно снижает фоторефрактивный эффект. Эффективность такой рекомбинации в значительной степени определяет интенсивность люминесценции в легированных кристаллах LiNbO_3 . Причем в этом случае наи-

большая интенсивность люминесценции наблюдается для кристаллов, в которых минимальна фоторефракция, что было показано на примере кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Gd}$ [14]. По-видимому, это справедливо и для кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$, по-

**Рис. 4.** Концентрационные зависимости периодов элементарной ячейки кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ от концентрации ZnO в расплаве.**Рис. 5.** Зависимости межатомных расстояний Li-O , $\text{Zn}_{\text{Li}}\text{-O}$, $\text{Nb}_{\text{Li}}\text{-O}$ в соответствующих октаэдрах от концентрации ZnO в расплаве (указаны номера образцов из табл. 1).

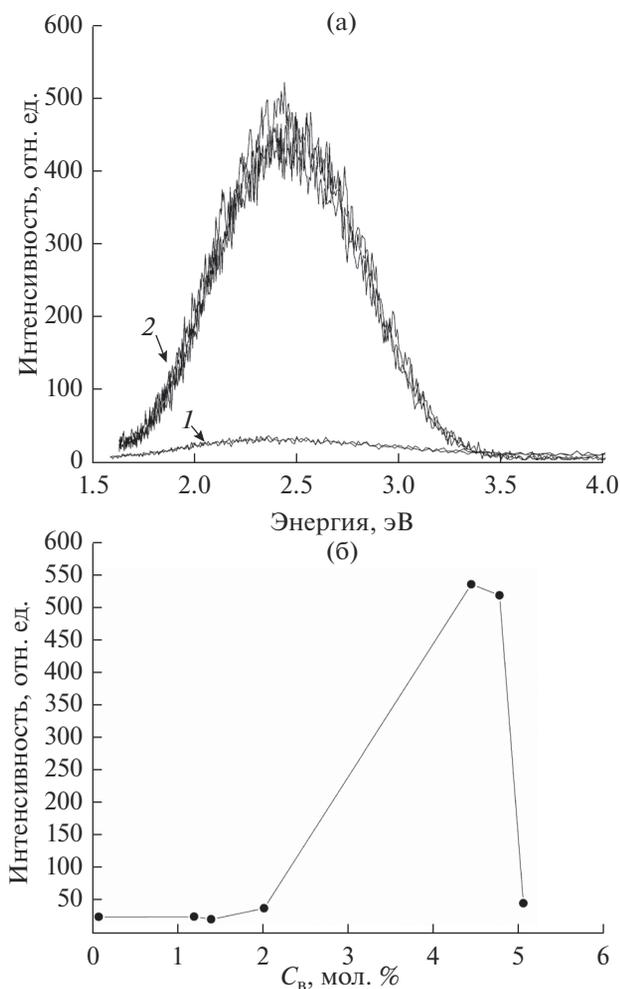


Рис. 6. Спектры КЛ кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$: 1 – $[\text{ZnO}] \approx 0.15$ мол. % в кристалле, 2 – $[\text{ZnO}] \approx 4.8$ мол. % в кристалле (а) и зависимость интенсивности КЛ кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ от концентрации ZnO в кристалле (б).

сколькo известно, что с увеличением концентрации цинка фоторефрактивный эффект в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ существенно понижается [1–7].

Основной КП при ~ 6.8 мол. % ZnO в расплаве кроме аномалий физико-химических характеристик сопровождается также существенными аномалиями структурных параметров и проявляет многие признаки структурного фазового перехода (ФП) [5–7]. Но, тем не менее, все перестройки структуры в диапазоне концентраций ~ 0 –9.0 мол. % ZnO происходят в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ в рамках одной пр. гр. ($R3c$). Рентгенограммы всех исследованных в работе образцов соответствовали рентгенограмме LiNbO_3 с пр. гр. $R3c$. На рис. 7 приведены типичные рент-

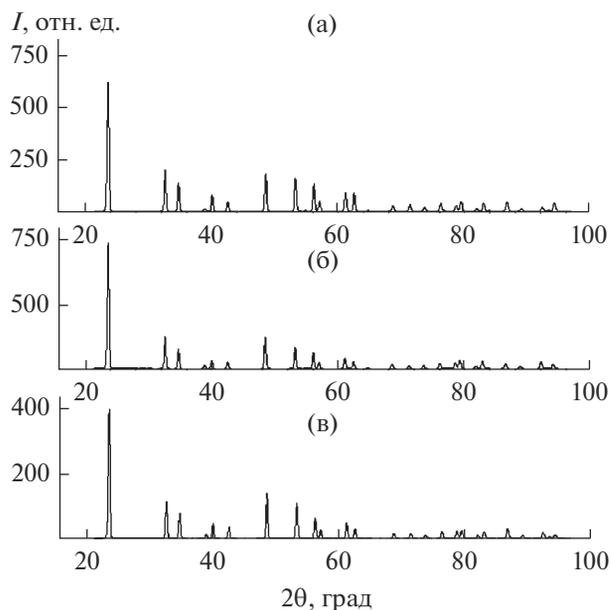


Рис. 7. Рентгенограммы порошковых образцов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$, содержащих 3.43 (а), 4.76 (б) и 5.19 мол. % ZnO в кристалле (в).

генограммы образцов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$. Все рентгенограммы подобны, однако наблюдается перераспределение интенсивностей при изменении концентрации цинка. Отсутствие структурного ФП с изменением пр. гр. кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ в области основного концентрационного порога, по-видимому, обусловлено высокой собственной дефектностью нестехиометрической фазы переменного состава – ниобата лития.

В работе с использованием 8 кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ уточнены концентрационные зависимости структурных параметров в области основного КП (в работах [6, 7] использовались только 4 кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$). Уточнение профильных характеристик рентгенограмм и структурных характеристик исследуемых образцов проводилось методом Ритвельда с использованием программного комплекса PdWin. В табл. 1 приведены значения периодов (a , c) элементарной ячейки образцов (в скобках указана погрешность в последней значащей цифре), а также концентрации ZnO в расплаве и в верхней части кристалла. На рис. 4 представлены зависимости периодов элементарной ячейки от концентрации ZnO в расплаве.

Из анализа данных табл. 1 и рис. 4 видно, что по достижении концентрации ZnO в расплаве ~ 6.8 мол. % оба периода элементарной ячейки образцов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ резко уменьшаются. Минимум на зависимости наблюдается при ~ 7.0 мол. %

ZnO в расплаве (рис. 4). При дальнейшем росте концентрации примеси (до ~7.8 мол. % ZnO в расплаве) происходит возрастание периодов элементарной ячейки до значений, соответствующих кристаллу $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$, выращенному из расплава с концентрацией примеси ~6.8 мол. % ZnO (табл. 1 и рис. 4). То есть у образцов кристаллов 5 и 8 (табл. 1) концентрации ZnO в верхней части кристалла равны (~5.19 мол. %), что обусловлено существенным уменьшением коэффициента распределения примеси при увеличении концентрации ZnO в расплаве [5–7] (табл. 1 и рис. 4).

Таким образом, прохождение основного КП сопровождается существенными аномалиями структурных характеристик, обусловленными общей нестабильностью структуры в области критических концентраций. Так, на рис. 5 представлены зависимости коротких и длинных межатомных расстояний металл–кислород в октаэдрах NbO_6 [6] от концентрации ZnO в расплаве. При этом наблюдается концентрационная анизотропия деформации кислородных октаэдров. В области критических концентраций ZnO в расплаве (основной КП) виден аномальный ход зависимостей длин связей металл–кислород. Аномальные изменения длин связей металл–кислород в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ определяют общую нестабильность их структуры в области критических концентраций примеси. Кроме того, они показывают очень сильную степень искаженности октаэдров в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ по отношению к октаэдрам, образующим мотив структуры кристалла LiNbO_3 _{стех.} Таким образом, основной КП (~6.8 мол. % ZnO в расплаве) отчетливо проявляется на концентрационных зависимостях физико-химических [5–7] и структурных характеристик (табл. 1, рис. 4 и 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методами спектроскопии КРС, полнопрофильного анализа рентгенограмм, оптической спектроскопии и КЛ монокристаллов исследована эволюция структуры и электронной подсистемы, установлена тесная взаимосвязь аномалий концентрационных зависимостей структурных, оптических характеристик, интенсивности КЛ и радиационной стойкости с пороговыми эффектами в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$. При этом подтверждено наличие и уточнено положение КП в области низких (~1.17 мол. % ZnO в кристалле) и средних (~4.8 мол. % ZnO в кристалле) концентраций примеси, а также основного КП вблизи ~6.8 мол. % ZnO в расплаве.

КП в области низких концентраций примеси обнаруживается на концентрационных зависи-

мостях спектров КРС и оптических свойств, характеризующих радиационную стойкость кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$. КП в области средних концентраций отчетливо обнаруживает себя как при исследовании радиационной стойкости, так и на концентрационных зависимостях интенсивности КЛ кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$. В то же время, основной КП при ~6.8 мол. % ZnO в расплаве (5.19 мол. % ZnO в кристалле) отчетливо проявляется на концентрационных зависимостях как физико-химических, так и структурных характеристик.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-03-00231-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волк Т.Р., Рубинина Н.М. Нефоторефрактивные примеси в ниобате лития: магний и цинк // Физика твердого тела. 1991. Т. 33. № 4. С. 1192–1201.
2. Schlarb U., Woehlecke M., Gather B., Reichert A., Betzler K., Volk T., Rubinina N. Refractive Indices of Zn-Doped Lithium Niobate // Opt. Mater. 1995. V. 4. P. 791–795. doi 10.1016/0925-3467(95)00018-6
3. Черная Т.С., Волк Т.Р., Верин И.А., Симонов В.И. Пороговые концентрации в допированных цинком кристаллах ниобата лития и их структурная обусловленность // Кристаллография 2008. Т. 53. № 4. С. 612–617.
4. Сидоров Н.В., Яничев А.А., Палатников М.Н., Габаин А.А. Эффекты упорядочения структурных единиц катионной подрешетки кристаллов и их проявление в спектре комбинационного рассеяния света // Оптика и спектроскопия. 2014. Т. 116. С. 306–315. doi 10.7868/S0030403414010206
5. Палатников М.Н., Бирюкова И.В., Макарова О.В., Ефремов В.В., Кравченко О.Э., Скиба В.И., Сидоров Н.В., Ефремов И.Н. Выращивание сильно легированных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ // Неорган. материалы. 2015. Т. 51. № 4. С. 428–432. doi 10.7868/S0002337X15040120
6. Palatnikov M.N., Sidorov N.V., Manukovskaya D.V., Makarova O.V., Aleshina L.A., Kadetova A.V. Concentration Threshold Effect on Properties of Zinc-Doped Lithium Niobate Crystals // J. Am. Ceram. Soc. 2017. V. 100. № 8. P. 3703–3711. doi 10.1111/jace.14851
7. Палатников М.Н., Сидоров Н.В., Макарова О.В., Бирюкова И.В. Фундаментальные аспекты технологии сильно легированных кристаллов ниобата лития. Апатиты: КНЦ РАН, 2017. 241 с.
8. Парфинович И.А., Пензина Э.Э. Электронные центры окраски в ионных кристаллах. Иркутск: Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1977. 208 с.
9. Палатников М.Н. Спектральные характеристики и дефектная структура γ -облученных монокристаллов ниобата лития различного химического состава

- ва // Неорган. материалы. 2008. Т. 44. № 5. С. 621–624.
10. Палатников М.Н., Сидоров Н.В., Макарова О.В., Панасюк С.Л., Куркамгулова Е.Р., Юдин И.В. Взаимосвязь оптической и радиационной стойкости и зависимость радиационной стойкости от пороговых эффектов в кристаллах LiNbO_3 , легированных Zn // Неорган. материалы. 2018. Т. 54. № 1. С. 59–65. doi 10.7868/S0002337X18010116
 11. Волк Т.Р., Иванов М.А., Мейльман М.Л., Рубина Н.М. К интерпретации радиационных оптических эффектов в ниобате лития // Физика твердого тела. 1987. Т. 29. № 3. С. 871–873.
 12. Сидоров Н.В., Волк Т.Р., Маврин Б.Н., Калинин В.Т. Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны. М.: Наука, 2003. 255 с.
 13. Блистанов А.А., Любченко В.М., Горюнова А.Н. Рекомбинационные процессы в кристаллах LiNbO_3 // Кристаллография. 1998. Т. 43. № 1. С. 86–91.
 14. Палатников М.Н., Сидоров Н.В., Бирюкова И.В., Чуфырев П.Г., Калинин В.Т. Упорядочение структуры и оптические характеристики легированных монокристаллов ниобата лития // Перспективные материалы. 2003. № 4. С. 48–54.