

УДК 535.361:456.34:882

ДЕФЕКТНАЯ СТРУКТУРА КРИСТАЛЛОВ LiNbO_3 , ЛЕГИРОВАННЫХ ЦИНКОМ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ

© 2019 г. Н. В. Сидоров¹, *, Л. А. Бобрева¹, М. Н. Палатников¹, О. В. Макарова¹

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

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

Поступила в редакцию 14.12.2018 г.

После доработки 21.01.2019 г.

Принята к публикации 11.02.2019 г.

По спектрам ИК-поглощения в области валентных колебаний ОН-групп, спектрам КРС, спектрам оптического поглощения показано, что в кристаллах LiNbO_3 , легированных цинком, вблизи концентрационного порога при ≈ 6.76 мол. % ZnO в расплаве происходит кардинальное изменение механизма вхождения Zn в структуру кристалла, характера водородных связей и связанных с ними заряженных комплексных протонсодержащих дефектов $V_{\text{Li}}^- - \text{OH}^-$, $\text{Nb}_{\text{Li}}^- - \text{OH}^-$ и $\text{Zn}_{\text{Nb}}^{3-} - \text{OH}^-$.

Ключевые слова: кристалл ниобата лития, ИК-спектроскопия, валентные колебания ОН[−]-групп, комплексные дефекты

DOI: 10.1134/S0002337X19070170

ВВЕДЕНИЕ

Основными дефектами катионной подрешетки чистых конгруэнтных ($R = \text{Li}/\text{Nb} = 0.946$) кристаллов ниобата лития (LiNbO_3) являются точечные дефекты Nb_{Li} и V_{Li} , представляющие собой соответственно катионы Nb^{5+} и вакантные кислородные октаэдры, находящиеся в позициях катионов Li^+ идеальной структуры стехиометрического состава [1–3]. Дефекты Nb_{Li} являются глубокими ловушками электронов и оказывают существенное влияние на физические характеристики кристалла [4]. При легировании кристалла LiNbO_3 происходит изменение как отношения Li/Nb , так и распределения по октаэдрам основных (Li^+ , Nb^{5+}) и примесных катионов.

С увеличением концентрации легирующих добавок Zn^{2+} , Mg^{2+} , Gd^{3+} и др. одновременно работают два механизма их вхождения в структуру конгруэнтного кристалла, конкурирующие между собой [3]. Упорядочивающий механизм приводит к вытеснению избыточных катионов Nb^{5+} , к упорядочению катионов (основных и легирующих) и вакансий вдоль полярной оси, уменьшению числа литиевых вакансий. Разупорядочивающий механизм — к нарушению порядка следования катионов вдоль полярной оси собственно легирующими катионами. При малых концентрациях примеси преобладает упорядочивающий механизм, что проявляется в уменьшении ширины ли-

ний в спектре комбинационного рассеяния света (КРС) [3]. С увеличением концентрации легирующей добавки механизм разупорядочения начинает преобладать и ширины линий в спектре КРС увеличиваются [3]. Взаимодействие упорядочивающего и разупорядочивающего механизмов отчасти обуславливает существование концентрационных порогов (КП) в легированных кристаллах LiNbO_3 .

При малых концентрациях катионам Zn^{2+} энергетически выгодно в первую очередь замещать точечные дефекты Nb_{Li} , образуя точечные дефекты Zn_{Li} [4]. При этом изменяется структура

сложных комплексных дефектов $V_{\text{Li}}^- - \text{OH}^-$, $\text{M} - \text{OH} - \text{M}$, $\text{M} - \text{OH}^-$ (M — легирующий металл), образованных ОН-группами с точечными дефектами Nb_{Li} и V_{Li} [5, 6]. Наличие в кристалле LiNbO_3 ОН[−]-групп изменяет диэлектрические характеристики кристалла, повышает низкотемпературную проводимость и эффект фоторефракции, понижает величину коэрцитивного поля [2, 5]. Параметры связи О—Н очень чувствительны к тонким особенностям изменения кристаллического окружения [5]. Существенную информацию о комплексных дефектах $V_{\text{Li}}^- - \text{OH}^-$, $\text{M} - \text{OH}^-$, $\text{M} - \text{OH} - \text{M}$ и др. в структуре кристаллов LiNbO_3 разного состава можно получить из спектров инфракрасного (ИК) поглощения LiNbO_3 в области валентных колебаний ОН[−]-групп. Такая инфор-

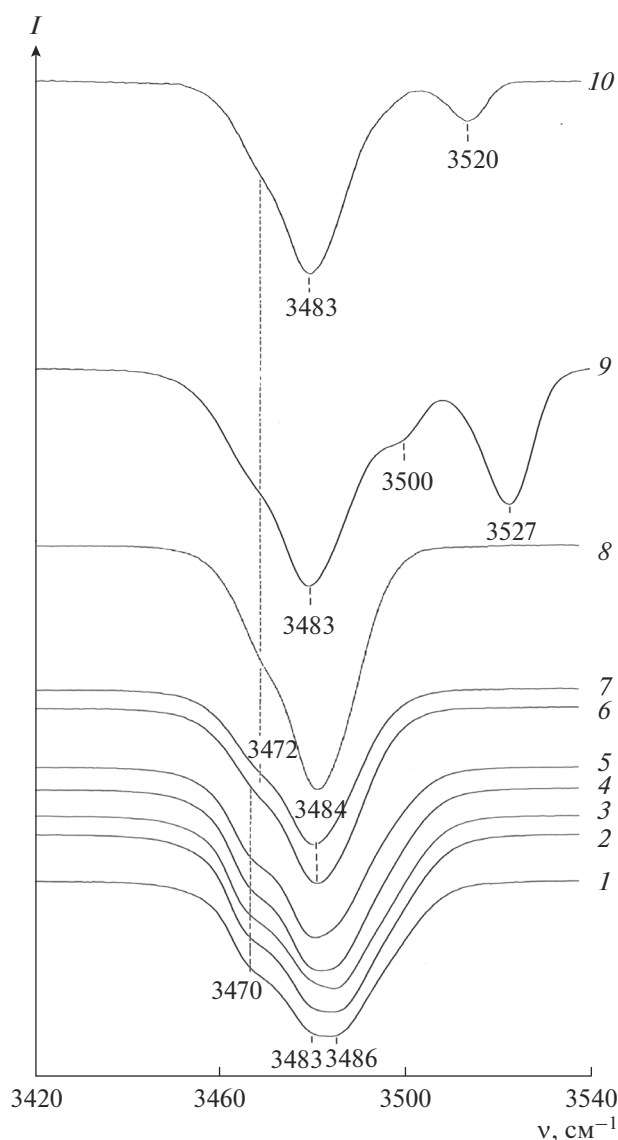


Рис. 1. Спектры ИК-поглощения кристаллов: 1 – LiNbO_3 конгр., 2 – $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}(0.04)$, 3 – $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}(0.07)$, 4 – $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}(1.19)$, 5 – $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}(1.40)$, 6 – $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}(2.01)$, 7 – $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}(4.46)$, 8 – $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}(4.54)$, 9 – $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}(4.68)$, 10 – $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}(6.5 \text{ мол. \% ZnO в кристалле})$.

мация необходима для отработки технологий легированных кристаллов LiNbO_3 высокой степени оптического совершенства с низким эффектом фоторефракции.

В данной работе по спектрам ИК-поглощения в области валентных колебаний ОН-групп, оптическим спектрам пропускания и по спектрам КРС исследованы структурные перестройки, включая области концентрационных порогов, в серии монокристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}(0.04\text{--}6.5 \text{ мол. \% ZnO в кристалле})$.

кристалле), возникающие при изменении концентрации цинка.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Монокристаллы $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}(0.04\text{--}6.5 \text{ мол. \% ZnO в кристалле})$ выращивали методом Чохральского по единой технологии, описанной в работах [7, 8]. Использовалась гранулированная шихта конгруэнтного состава, полученная методом синтеза-грануляции [8]. Кристаллы были монодоменизированы методом высокотемпературного электродиффузионного отжига при охлаждении образцов со скоростью $20^\circ\text{C}/\text{ч}$ в температурном интервале $\sim 1240\text{--}890^\circ\text{C}$ в условиях приложения электрического напряжения. Контроль степени монодоменистости осуществлялся методом анализа частотной зависимости электрического импеданса и путем определения величины статического пьезомодуля ($d_{333 \text{ ст}}$) кристаллической були. Образцы для исследований вырезались из монодоменизированных кристаллов в форме прямоугольных параллелепипедов ($\sim 8 \times 7 \times 6 \text{ мм}$), ребра которых совпадали по направлению с кристаллофизическими осями X, Y, Z (Z – полярная ось кристалла). Грани параллелепипедов тщательно полировались. Регистрация спектров ИК-поглощения проводилась спектрометром IFS 66 v/s фирмы Bruker. Спектры КРС возбуждались линией 514.5 нм аргонового лазера Spectra Physics (модель 2018-RM) и регистрировались спектрографом T64000 производства фирмы Horiba Jobin с использованием конфокального микроскопа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены спектры ИК-поглощения в области валентных колебаний ОН-групп монокристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ с различной концентрацией цинка (0.04–6.5 мол. % ZnO в кристалле) и спектр номинально чистого конгруэнтного кристалла LiNbO_3 конгр. По виду ИК-спектров исследованные кристаллы отчетливо подразделяются на две группы, что хорошо согласуется с наличием нескольких основных участков на концентрационной зависимости эффективного коэффициента распределения $K_{\text{эф}}$ (отношение концентрации легирующей добавки цинка в верхней части кристалла к ее концентрации в расплаве), описанных в работе [8]. Для первой группы кристаллов ($\text{LiNbO}_3\text{:Zn}(0.04\text{--}4.54 \text{ мол. \% ZnO в кристалле})$), выращенных из расплавов с концентрацией ниже основного КП ($\sim 6.76 \text{ мол. \% ZnO в расплаве}$), $\sim 0.76 < K_{\text{эф}} < 1.1$ [8]). Для этой группы кристаллов в ИК-спектре наблюдаются три сильно перекрывающиеся полосы поглощения с частотами $\sim 3470, 3483$ и 3486 см^{-1} (рис. 1, кривые 1–8).

Кристаллы этой группы отличаются высокой концентрационной и оптической однородностью по объему выращенной були, характерной для кристаллов, выращенных из расплавов с $K_{\text{эф}}$, близким к единице [8]. Из рис. 1 видно, что даже для кристаллов первой группы с увеличением концентрации цинка наблюдаются заметные изменения в спектре: полосы с частотами 3483 и 3486 см^{-1} сливаются в одну широкую полосу с частотой 3484 см^{-1} и заметно изменяются интенсивность и частота полосы $\sim 3470 \text{ см}^{-1}$.

Обнаруженные изменения в спектрах кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}(0.04\text{--}4.54 \text{ мол. \% ZnO в кристалле})$ обусловлены взаимодействием упорядочивающего и разупорядочивающего механизмов [3, 4], которое приводит к изменению характера локализации катионов Zn^{2+} в кислородных октаэдрах структуры и связанной с этим перестройке структуры сложных комплексных дефектов, образованных собственными и примесными точечными дефектами с включением OH^- -групп. Они могут быть объяснены следующим образом.

В кристалле LiNbO_3 конгр существуют преимущественно точечные дефекты Nb_{Li} (до 5%) и V_{Li} , а также связанные с ними заряженные комплексные дефекты: $V_{\text{Li}}^- - \text{OH}^-$, $\text{Nb}_{\text{Li}} - \text{OH}^-$, обусловленные наличием OH^- -групп в структуре кристалла LiNbO_3 [2, 3, 5]. В ИК-спектрах поглощения этим видам комплексных дефектов отвечают полосы с частотами 3470, 3483 и 3486 см^{-1} [9]. В кристаллах, легированных цинком, существуют точечные дефекты Nb_{Li} , Zn_{Li} , Zn_{Nb} и V_{Li} и связанные с ними заряженные комплексные дефекты $V_{\text{Li}}^- - \text{OH}^-$, $\text{M} - \text{OH} - \text{M}$, $\text{M} - \text{OH}$ [3–6]. С повышением концентрации цинка дефекты Nb_{Li} постепенно замещаются дефектами Zn_{Li} . Вследствие сохранения электронейтральности при этом уменьшается число дефектов V_{Li} и связанных с ними заряженных комплексных дефектов $V_{\text{Li}}^- - \text{OH}^-$.

При малых концентрациях цинка в ИК-спектре параметры полос поглощения с частотами 3483 и 3486 см^{-1} , соответствующими валентным колебаниям OH^- -групп в комплексе $V_{\text{Li}}^- - \text{OH}^-$, практически не изменяют своего положения (рис. 1, кривые 2–8), но уширяются, сливаясь в широкую полосу с частотой $\sim 3484 \text{ см}^{-1}$, что убедительно свидетельствует об увеличении беспорядка в расположении водородных связей. В то же время, частота валентного колебания OH^- -групп в комплексе $\text{Nb}_{\text{Li}} - \text{OH}^-$ увеличивается от 3470 до 3472 см^{-1} , что свидетельствует о небольшом увеличении жесткости OH^- -связи (рис. 1).

Иная ситуация реализуется для кристаллов, выращенных из расплава с концентрацией ZnO

выше основного КП при $\sim 6.76 \text{ мол. \% ZnO}$ в расплаве, при котором свойства системы расплава-кристалл изменяются радикально, а $K_{\text{эф}}$ скачком уменьшается с 0.76 до 0.68 [8]. Для “послепороговых” кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$, по-видимому, реализуется такая перестройка структуры катионной подрешетки, при которой катионы цинка начинают вытеснять катионы ниобия из собственных позиций Nb_{Nb} , образуя точечные дефекты $\text{Zn}_{\text{Nb}}^{3-}$. При этом наблюдаются существенные изменения в спектрах ИК-поглощения в области валентных колебаний OH^- -групп (рис. 1, кривая 9). Отрицательные точечные дефекты $\text{Zn}_{\text{Nb}}^{3-}$ способны локализовать ионы водорода, образуя комплексный дефект $\text{Zn}_{\text{Nb}}^{3-} - \text{OH}^-$. Этому комплексному дефекту в спектре “послепорогового” кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}(4.68 \text{ мол. \% ZnO в кристалле})$ соответствуют полосы поглощения с частотами ~ 3500 и 3527 см^{-1} (рис. 1, кривая 9). Наличие этих полос поглощения характерно для всех “послепороговых” кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$, выращенных из расплава с $[\text{ZnO}] \geq 6.76 \text{ мол. \%}$. Так, для кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}(6.5 \text{ мол. \% ZnO в кристалле})$ о наличии комплексных дефектов $\text{Zn}_{\text{Nb}}^{3-} - \text{OH}^-$ свидетельствует присутствие в спектре полосы поглощения с частотой 3520 см^{-1} (рис. 1, кривая 10).

Исследование спектров КРС показывает, что образование в структуре комплексных дефектов различного вида при легировании кристалла LiNbO_3 цинком “возмущает” кислородные октаэдры структуры и изменяет порядок расположения структурных единиц катионной подрешетки кристалла вдоль полярной оси. На рис. 2 представлены спектры кристалла LiNbO_3 конгр и серии монокристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}(0.04\text{--}5.84 \text{ мол. \% ZnO в кристалле})$ в геометрии рассеяния $Y(ZZ)\bar{Y}$, в которой активны колебания внутриоктаэдрических катионов (200–350 см^{-1}) и колебания кислородных октаэдров (550–700 см^{-1}) $A_1(TO)$ -типа симметрии. В этой области спектра наблюдаются четыре линии с частотами $\sim 254, 276, 331, 630 \text{ см}^{-1}$. Видно, что увеличение концентрации цинка в целом приводит к увеличению беспорядка в расположении внутриоктаэдрических катионов вдоль полярной оси и к “возмущению” кислородных октаэдров, что проявляется в уширении спектральных линий (рис. 2). В то же время, из спектров видно, что при концентрации 0.04 мол. % ZnO в кристалле $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ наблюдается упорядочение структурных единиц катионной подрешетки. При этом линии с частотами 254 и 276 см^{-1} , отвечающие соответственно $A_1(TO)$ -колебаниям ионов ниобия и лития вдоль полярной оси, заметно сужаются (рис. 2). Из рис. 2 видно также, что с увеличением концентрации цинка наблюдается уменьшение ча-

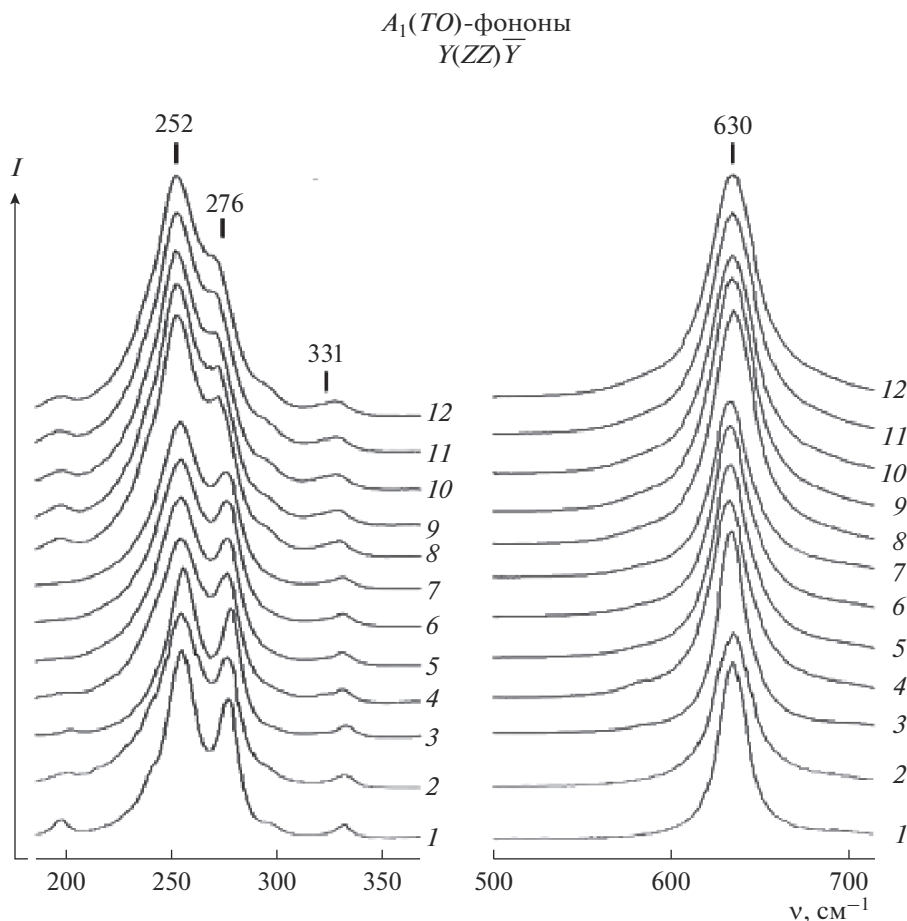


Рис. 2. Спектры КРС кристаллов: 1 – LiNbO_3 _{стех}, 2 – LiNbO_3 _{конгр}, 3 – $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ (0.04), 4 – $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ (0.07), 5 – $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ (1.19), 6 – $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ (1.40), 7 – $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ (2.01), 8 – $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ (3.43), 9 – $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ (3.95), 10 – $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ (5.19) (6.76 мол. % ZnO в расплаве), 11 – $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ (5.19) (7.8 мол. % ZnO в расплаве), 12 – $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ (5.84 мол. % ZnO в кристалле).

стоты линии, соответствующей $A_1(TO)$ -колебаниям ионов Li^+ , с 276 см^{-1} (LiNbO_3 _{конгр}) до 270 см^{-1} ($\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ (5.84 мол. % ZnO в кристалле)). При этом частоты линий, соответствующих $A_1(TO)$ -колебаниям ионов Nb^{5+} (255 см^{-1}) и кислородных октаэдров (630 см^{-1}) остаются постоянными. Уменьшение частоты линии при увеличении концентрации цинка обусловлено замещением легких ионов Li^+ более тяжелыми ионами Zn^{2+} .

Существенное различие оптической однородности и дефектной структуры “послепороговых” и “допороговых” кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ подтверждено исследованиями оптических спектров пропускания. Поскольку спектры пропускания отражают информацию об оптических характеристиках кристалла на всем пути следования светового луча, увеличение толщины исследуемого образца позволяет проявиться тем элементам дефектной структуры, которые не наблюдаются при исследовании сравнительно тонких пластин, т.е. структур-

ную однородность кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ можно качественно оценить путем анализа спектров пропускания, полученных от образцов разной толщины, изготовленных из одного того же кристалла. На рис. 3 представлены спектры образцов разной толщины, изготовленных из “послепорогового” и “допорогового” кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$. Спектры тонких (1 мм) пластин “послепорогового” и “допорогового” кристаллов имеют очень малые отличия как по уровню прозрачности ($\sim 73\%$), так и по значению края поглощения (~ 311 и 313 нм соответственно). Для образцов толщиной 3 мм уже заметны некоторые отличия: спектры имеют точки пересечения вблизи 324 и 368 нм , крутизна подъема спектра в область прозрачности “допорогового” кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ выше длины волны 324 нм заметно больше, чем “послепорогового”, что свидетельствует о том, что он обладает более высокой оптической однородностью (рис. 3, кривые 2 и 5). Спектры образцов с толщиной 26 мм совсем не имеют пересечений, “допорого-

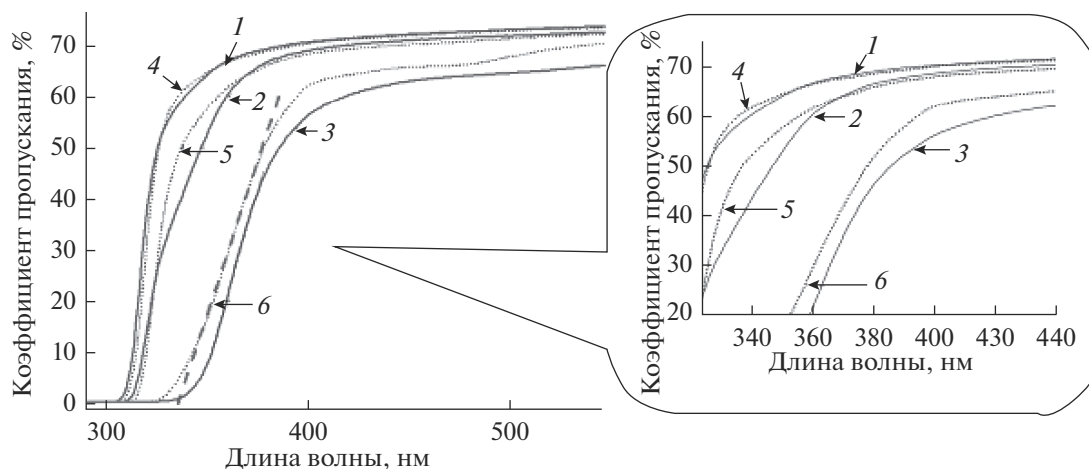


Рис. 3. Спектры пропускания кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ от образцов разной толщины: “послепороговый” кристалл ($[\text{ZnO}] = 8.91$ мол. % в расплаве) (1 – 1, 2 – 3, 3 – 26 мм); “допороговый” кристалл ($[\text{ZnO}] = 4.02$ мол. % в расплаве) (4 – 1, 5 – 3, 6 – 26 мм).

вый” кристалл $\text{LiNbO}_3\text{:ZnO}$ имеет более высокое пропускание ($\sim 5\%$) и сдвинут в область коротких длин волн (на ~ 5 нм) (рис. 3, кривые 3 и 6).

Из спектров пропускания путем аппроксимации прямолинейных участков спектра (рис. 3, касательная к кривой 6) были определены значения края поглощения λ_0 образцов кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ разной толщины. Используя смещение края поглощения λ_0 при исследовании спектров пропускания одного и того же кристалла в зависимости от толщины образца, можно сделать оценку уровня его дефектности и степени пространственной неоднородности. Для этого строится зависимость $\lambda_0 = f(l)$, где l – толщина образца, и прово-

дится ее линейная аппроксимация к нулевой толщине, тангенс угла наклона которой графически демонстрирует уровень дефектности и степень пространственной неоднородности кристалла (рис. 4). Чем больше угол наклона, тем менее пространственно однороден кристалл. Из рис. 4 видно, что кристалл $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$, выращенный из “послепорогового” расплава, отличается существенно большей неоднородностью вдоль оси c , о чем свидетельствует угол наклона зависимости $\lambda_0 = f(l)$. Причем уровень дефектности и степень пространственной неоднородности кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ возрастают скачком в области основного КП и

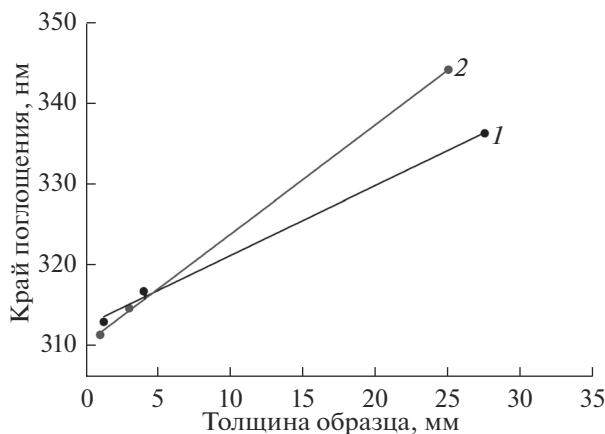


Рис. 4. Зависимости значения края поглощения λ_0 от толщины образцов “допорогового” (1) и “послепорогового” (2) кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$, выращенных из расплава с концентрацией $\text{ZnO} \sim 4.02$ и 8.91 мол. % соответственно.

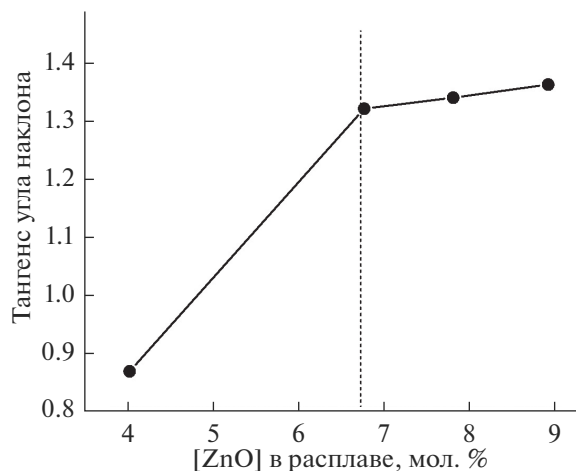


Рис. 5. Тангенсы угла наклона зависимостей $\lambda_0 = f(l)$ кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$, выращенных из расплавов с различной концентрацией ZnO (~ 4.0 – 9.0 мол. %); штриховая линия показывает положение основного концентрационного порога при ~ 6.76 мол. % ZnO в расплаве.

далее линейно с увеличением концентрации цинка (рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По концентрационным изменениям в спектрах ИК-поглощения в области валентных колебаний ОН-групп, в оптических спектрах пропускания вблизи края фундаментального поглощения и в спектрах КРС исследованы особенности дефектной структуры и оптическая однородность серии монокристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ (0.04–6.5 мол. % ZnO). С увеличением концентрации цинка обнаружена существенная трансформация спектров ИК-поглощения, выражающаяся для “допороговых” кристаллов в изменении параметров линий с частотами 3470, 3483, 3486 см^{-1} , а для “послепороговых” кристаллов в появлении новых линий в ИК-спектре с частотами ~ 3500 и 3527 см^{-1} . При этом спектры КРС свидетельствуют об изменениях порядка чередования основных и легирующих катионов вдоль полярной оси и о “возмущении” кислородных октаэдров структуры при увеличении концентрации цинка.

Полученные данные свидетельствуют о том, что в области основного концентрационного порога при ≈ 6.76 мол. % ZnO в расплаве происходят радикальные изменения физико-химических характеристик системы кристалл–расплав, сопровождающиеся скачкообразным уменьшением коэффициента распределения $K_{\text{эф}}$ и, соответственно, изменением механизмов вхождения катионов Zn^{2+} в структуру кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ и характера сложных комплексных протонсодержащих дефектов $\text{V}_{\text{Li}}^- - \text{OH}^-$, $\text{Nb}_{\text{Li}} - \text{OH}^-$ и $\text{Zn}_{\text{Nb}}^{3-} - \text{OH}^-$.

Исследование спектров пропускания образцов “допороговых” и “послепороговых” кристаллов различной толщины подтвердило существенное изменение оптической однородности и де-

фектной структуры кристаллов при прохождении основного концентрационного порога.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Iyi N., Kitamura K., Izumi F., Yamamoto J.K., Hayashi T., Asano H., Kimura S. Comparative Study of Defect Structures in Lithium Niobate with Different Compositions // *J. Solid State Chem.* 1992. V. 101. P. 340–352.
2. Lengyel K., Peter A., Kovacs L., Corradi G., Palfavi L., Hebling J., Unferdorben M., Dravecz G., Hajdara I., Szaller Zs., Polgar K. Growth, Defect Structure, and THz Application of Stoichiometric Lithium Niobate // *Appl. Phys. Rew.* 2015. V. 2. P. 040601–040628.
3. Сидоров Н.В., Волк Т.Р., Маврин Б.Н., Калинин В.Т. Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны. М.: Наука, 2003. 255 с.
4. Сидоров Н.В., Палатников М.Н., Яничев А.А., Габашин А.А., Крук А.А., Калинин В.Т. Упорядочения структурных единиц катионной подрешетки в кристаллах ниобата лития, легированных цинком // Докл. РАН. 2013. Т. 452. № 5. С. 529–533.
5. Cabrera J.M., Olivares J., Carrascosa M., Rams J., Müller R., Diéguez E. Hydrogen in Lithium Niobate // *Adv. Phys.* 1996. V. 45. № 5. P. 349–392.
6. Сидоров Н.В., Палатников М.Н., Бобрева Л.А., Новикова Н.Н. Проявление структурных особенностей кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ и $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}$ в спектре ИК-поглощения в области валентных колебаний ОН-групп // Неорган. материалы. 2017. Т. 53. № 7. С. 727–731. doi 10.7868/S0002337X17070107
7. Palatnikov M.N., Biryukova I.V., Sidorov N.V., Denisov A.V., Kalinnikov V.T., Smith P.G.R., Shur V.Ya. Growth and Concentration Dependencies of Rare-Earth Doped Lithium Niobate Single Crystals // *J. Cryst. Growth.* 2006. V. 291. P. 390–397.
8. Палатников М.Н., Сидоров Н.В., Макарова О.В., Бирюкова И.В. Фундаментальные аспекты технологии сильно легированных кристаллов ниобата лития. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2017. 241 с.
9. Kong Y., Zhang W., Chen X., Xu J., Zhang G. OH-Absorption Spectra of Pure Lithium Niobate Crystals // *J. Phys.: Condens. Matter.* 1999. V. 11. P. 2139–2143.