

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОТЖИГА ПЛАСТИН НИОБАТА ЛИТИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОТОНООБМЕННЫХ ВОЛНОВОДОВ

© 2022 г. А. В. Сосунов^{1,*}, И. В. Петухов¹, Александр А. Журавлев¹, Р. С. Пономарев^{1,2}, А. А. Молодкин^{3,4}, М. К. Кунева⁵

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

²Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Пермь, Россия

³Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”, Москва, Россия

⁴Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Москва, Россия

⁵Институт физики твердого тела АН Болгарии, София, Болгария

*E-mail: avsosunov@psu.ru

Поступила в редакцию 01.02.2022 г.

После доработки 01.02.2022 г.

Принята к публикации 22.02.2022 г.

С использованием структурных и оптических методов проведено комплексное исследование влияния предварительного отжига пластин ниобата лития X-среза производства Фомос-Материалы (Россия) на процесс формирования протонообменных планарных волноводов. Установлено, что предварительный гомогенизирующий отжиг вызывает снижение деформаций и плотности дислокаций в отожженных протонообменных волноводах. Показано, что структурно-фазовые превращения в процессе восстановительного отжига протекают быстрее для гомогенизированных образцов. Полученные результаты важны для производства фазовых и амплитудных модуляторов на основе ниобата лития со стабильными характеристиками.

DOI: 10.31857/S0023476122040166

ВВЕДЕНИЕ

Кристаллы ниобата лития (НЛ) широко применяются в качестве материала для модуляторов фазы и амплитуды излучения [1]. Уникальные свойства НЛ выделяют его на фоне других оптических материалов, а именно коммерческая доступность, высокие электрооптические коэффициенты ($r_{33} = 32$ пм/В), высокая температура Кюри (1145°C), широкое окно прозрачности (0.35–5.5 мкм), возможность формирования волноводных структур с помощью диффузии титана, протонного обмена, ионной имплантации и др. [2].

Одним из основных технологических методов создания волноводных структур в НЛ является протонный обмен (ПО) [3]. Суть метода состоит в частичном замещении ионов Li^+ в кристаллической решетке НЛ протонами (H^+). Глубина и свойства таких ПО-волноводов зависят от различных параметров: времени и температуры [4], источника протонов [5], свойств приповерхностного слоя НЛ [6] и его кристаллографической ориентации. Особенности прямого ПО являются ступенчатый профиль показателя преломления волноводов и деградация электрооптических коэффициентов НЛ. Для увеличения глубины

проникновения протонов, уменьшения внутренних напряжений и восстановления электрооптических коэффициентов проводят постобменный (восстановительный) отжиг [7, 8] при температурах 250–400°C. Восстановительный отжиг сопровождается чередой фазовых превращений с образованием стабильной α -фазы [9]. При этом профиль показателя преломления становится градиентным [10, 11]. Кроме того, оптические волноводы, полученные в результате ПО, являются поляризующими, что важно для их применения в волоконно-оптических гироскопах.

Практика показывает, что даже при номинально одинаковых условиях формирования волноводов их характеристики часто бывают разными в рамках одной партии пластин и даже на одной и той же пластине. Это объясняется наличием нарушенного приповерхностного слоя в кристалле, характеристики которого не отражают в техническом паспорте.

Известно, что структура приповерхностного слоя НЛ сильно отличается от остального объема кристалла [12, 13]. Эти изменения вызваны процессами резки, шлифовки и полировки пластин НЛ. Поэтому в приповерхностном слое повышается плотность точечных [13] и линейных дефек-

тов [14], что приводит к неконтролируемому изменению результатов формирования волноводов и их нестабильности под действием различных внешних факторов. Все указанные факты требуют как создания методов входного контроля пластин НЛ на производстве фотонных интегральных схем, так и применения методов гомогенизации структуры кристалла в рамках одной пластины.

При изготовлении протонообменных канальных волноводов часто используется обработка плазмой для очистки поверхности НЛ от загрязнений, а также для травления жертвенных масок. В [15] показано, что при плазменной обработке поверхности НЛ происходит повышение дефектности приповерхностного слоя, что, в свою очередь, влияет на процесс ПО, вызывая образование обогащенных протонами фаз твердого раствора $\text{Li}_{1-x}\text{H}_x\text{NbO}_3$ (X -срез), увеличение внутренних напряжений в этих фазах и даже локальное растворение поверхности в тех местах, где концентрация протонов в поверхностных слоях максимальна. На Z -срезе кристалла подобных эффектов обнаружено не было.

Для повышения однородности и стабильности ПО-волноводов может использоваться термический отжиг в различных средах, предлагаемый в [16, 17]. Было показано, что контролируемый предварительный отжиг НЛ приводит к устранению различных дефектов кристаллической решетки, которые считаются одной из основных причин дрейфовых явлений в электрооптических модуляторах.

Таким образом, гомогенизирующий предварительный отжиг является перспективным методом повышения качества и однородности поверхности пластин НЛ. Целью данной работы является комплексное исследование структуры и оптических характеристик протонообменных планарных волноводов на предварительно отожженных пластинах НЛ производства Фомос-Материалы (Россия).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемые образцы представляли собой шесть пластин конгруэнтного НЛ X -среза размером $10 \times 15 \times 1$ мм производства Фомос-Материалы (Россия), вырезанные из вейфера диаметром 76 мм. Формирование волноводов проводили по следующей методике. Половину пластин предварительно отжигали в воздушной атмосфере при температуре 500°C в течение 4 ч для повышения однородности (гомогенизации) приповерхностного слоя [17]. Далее все исследуемые образцы протонировали в закрытом циркониевом реакторе в расплаве бензойной кислоты при температуре 190°C в течение 2 ч. После этого все образцы отжигали при температуре 370°C в течение 6 ч

(для выявления присутствия в волноводе низкотемпературной κ_1 -фазы [18]), а затем дополнительно проводили отжиг в течение 1.5 ч при той же температуре для получения стабильной α -фазы. На каждом этапе образцы тщательно промывали в ультразвуковой ванне с изопропанолом в течение 5 мин, а затем в дистиллированной воде еще в течение 5 мин.

Для визуализации структуры κ_1 -фазы на поверхности пластин НЛ использовали светлопольную оптическую микроскопию в поляризованном свете (Olympus MX61).

Рентгенофазовый анализ проводили с помощью двухкристального спектрометра ДРОН УМ-1. В качестве монохроматора использовали монокристалл бездислокационного Si, установленный в отражающее положение K_β -линии Co-излучения ($\lambda = 1.62075 \text{ \AA}$) от кристаллографической плоскости (111). Все измерения проводили при комнатной температуре, ускоряющем напряжении 30 кВ, анодном токе 10 мА и щели шириной 0.05 мм.

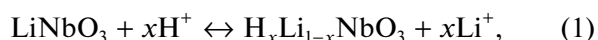
ИК-спектроскопию проводили с помощью фурье-спектрометра Spectrum Two (PerkinElmer) в диапазоне $1000\text{--}4000 \text{ см}^{-1}$ с разрешением 1.0 см^{-1} . Спектр поглощения получали в направлении, перпендикулярном полярной оси кристалла. Декомпозицию пиков проводили с помощью программы Fityk.

Профиль показателя преломления и глубину ПО-волноводов определяли методом призмного ввода [19]. Сначала вычисляли набор эффективных показателей преломления N_m на длине волны $\lambda_{\text{He-Ne}} = 632 \text{ нм}$. Затем с использованием полученных значений N_m и обратного метода Вентцеля–Крамерса–Бриллюэна [20] восстанавливали профиль показателя преломления по глубине протонообменного волноводного слоя.

Плотность дислокаций на поверхности ПО-слоев (α -фаза) определяли с помощью оптической микроскопии (Olympus BX51M) в режиме темного поля. Влажное селективное химическое травление осуществляли в расплаве гидроксида калия (KOH) с добавлением 35 мас. % гидроксида натрия (NaOH) в течение 2 мин с последующим погружением образцов в кипящую воду. Режим влажного селективного травления для всех образцов был идентичным.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе ПО ионы лития в кристалле НЛ замещаются ионами водорода (протонами) с образованием твердого раствора $\text{Li}_{1-x}\text{H}_x\text{NbO}_3$. Этот процесс можно описать формулой



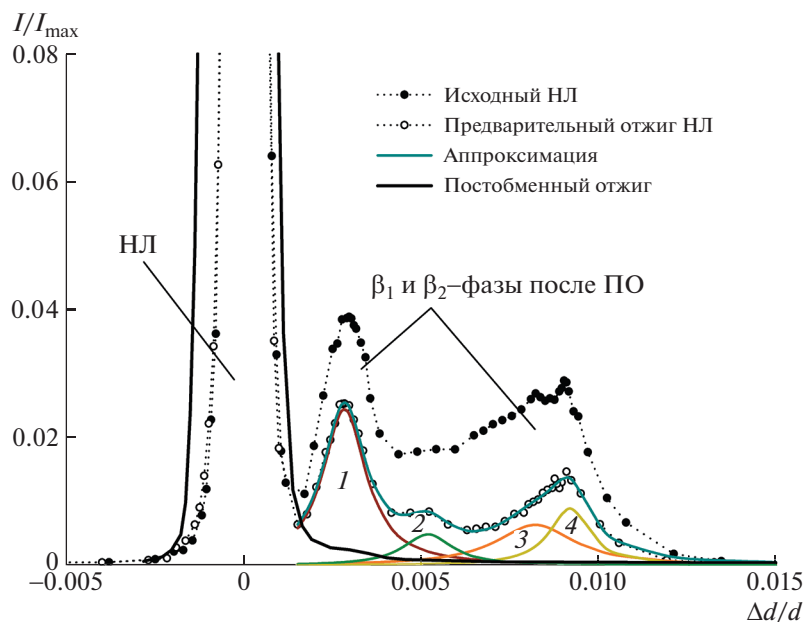


Рис. 1. Нормированная интенсивность спектральных компонентов рентгеновской дифракции I/I_{\max} как функция деформации ($\epsilon = \Delta d/d$) кристаллической решетки НЛ после ПО.

где x — это концентрация протонов. В результате происходит увеличение необыкновенного показателя преломления Δn_e , а обыкновенный показатель преломления уменьшается [4]. Таким образом, происходит формирование волновода, в котором поддерживается только одна поляризация излучения, лежащая в плоскости пластины НЛ (для X - и Z -срезов), совпадающая по направлению с полярной осью кристалла c (TE -мода). Это позволяет использовать максимальный электрооптический коэффициент в НЛ (r_{33}).

Рассмотрим результаты исследования структуры и оптических свойств планарных ПО-волноводов с гомогенизирующим предварительным отжигом пластин НЛ на каждом этапе их формирования.

Этап: свойства волноводов после ПО. Исследования фазовой структуры образцов проводили с помощью рентгеноструктурного анализа (РСА) (рис. 1) и ИК-спектроскопии (рис. 2). На рис. 1 показана динамика формирования фаз в зависимости от гомогенизирующего предварительного отжига пластины НЛ. Деформации (ϵ) кристаллической решетки НЛ (по смещению) рассчитывали по формуле Вульфа–Брэгга:

$$2d \sin \theta = n\lambda, \quad (2)$$

где n — порядок отражения, d — межплоскостное расстояние, θ — угол отражения. Выражая из формулы (2) межплоскостное расстояние d , с учетом смещения линий получаем

$$\epsilon = \frac{\Delta d}{d}, \quad (3)$$

где Δd — разница межплоскостных расстояний ПО-фазы и исходного НЛ. Это выражение справедливо для малых изменений Δd , т.е. для $\epsilon \ll 1$.

Декомпозиция кривой с помощью распределения Лоренца указывает на скачкообразное изменение деформаций кристаллической решетки и концентрации протонов. Рассчитанные величины относительных деформаций каждой фазы практически одинаковые до и после предварительного отжига, за исключением подпика 2 (табл. 1), который согласно структурно-фазовой диаграмме [21] отвечает за β_2 -фазу. При этом для всех исследуемых кристаллов НЛ наблюдается снижение интегральной интенсивности (S) спектральных компонентов фаз в среднем в 2 раза (табл. 1). То есть количество протонов, занимающих позиции в междоузлиях [22, 23], а не в кислородных плоскостях [24], снижается после проведения предварительного отжига. Междоузельные протоны обладают высокой степенью подвижности. Увеличение концентрации междоузельных протонов приводит к более высоким напряжениям и деформациям в кристаллической решетке НЛ. Этот эффект связан с приповерхностным слоем (до 20 мкм) НЛ, который либо насыщен дефектами структуры [14], места которых могут занимать дополнительные протоны, либо таких позиций существенно меньше за счет гомогенизации этого слоя и поверхности кристалла. Таким образом, для повышения стабильности и долговременной работы ПО-волноводов необходимо добиваться снижения внутренних напряжений.

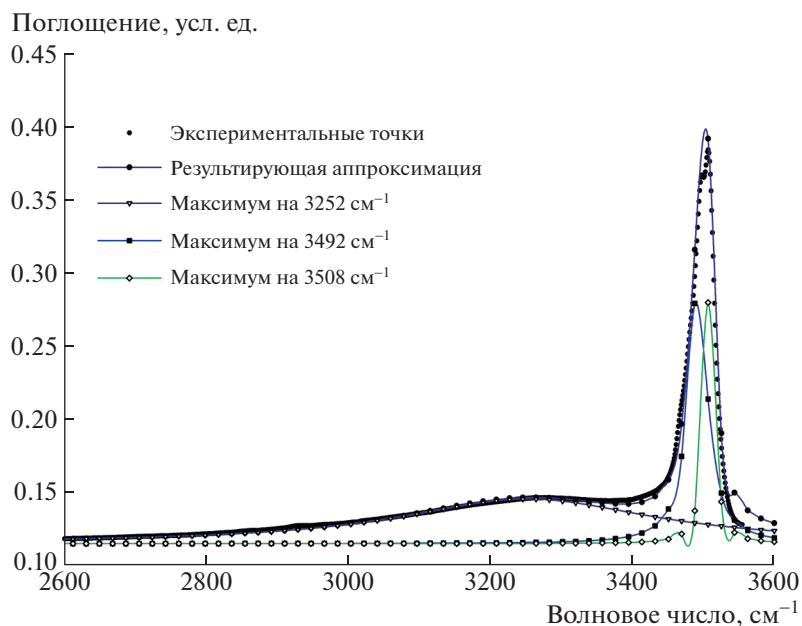


Рис. 2. ИК-спектр образца с предварительным отжигом подложки НЛ после ПО.

По данным РСА и модовой спектроскопии были идентифицированы кристаллические фазы β_1 и β_2 на поверхности пластины с помощью структурно-фазовой диаграммы [21]. Эти результаты также подтверждены с помощью ИК-спектроскопии, данные которой (рис. 2) после ПО полностью согласуются с результатами РСА в части фазового состава. Был обнаружен поляризованный перпендикулярно полярной оси кристалла максимум при 3508 см^{-1} , что соответствует β_1 -фазе, и 3252 см^{-1} для β_2 -фазы [25].

Результаты модовой спектроскопии (рис. 3) не демонстрируют какой-либо существенной разницы в оптических характеристиках волноводов до и после гомогенизирующего предварительного отжига. Профиль показателя преломления $\Delta n_e(h)$ по глубине (h) волноводного слоя имеет ступенчатый вид с глубиной $\delta = 1.60 \pm 0.01 \text{ мкм}$. Приращение показателя преломления (Δn_e) на поверхности НЛ после предварительного отжига увели-

чивается с 0.1127 ± 0.0002 до 0.1135 ± 0.0002 . Несколько большее значение Δn_e на поверхности волновода после предварительного отжига, вероятно, связано с тем, что снижение концентрации дефектов поверхностного слоя замедляет диффузию протонов вглубь кристалла.

II этап: свойства волноводов после восстановительного отжига. Восстановительный отжиг необходим для снятия высоких внутренних напряжений после ПО, а также для повышения электрооптических коэффициентов НЛ. В процессе восстановления структуры НЛ происходит цепочка фазовых превращений. Последовательность фазовых превращений при отжиге ПО-слоев, сформированных на кристаллах НЛ (X -срез), будет следующей: β_1, β_2 -фазы $\rightarrow \kappa_2$ -фаза $\rightarrow \kappa_1$ -фаза $\rightarrow \alpha$ -фаза [18]. Особенностью фазовых превращений на X -срезе кристалла НЛ является то, что превращение κ_2 -фазы в κ_1 -фазу происходит через образование частиц κ_1 -фазы (образующих моду-

Таблица 1. Деформации (ϵ) и интегральные интенсивности (S) компонентов дифракционного спектра протонообменных фаз (рис. 1)

Компонента спектра	$\epsilon, 10^{-3}$		$S, 10^{-5}$, отн. ед.	
	Предварительный отжиг НЛ	Исходный НЛ	Предварительный отжиг НЛ	Исходный НЛ
1	2.8	2.9	5.7	9.3
2	5.2	6.0	1.3	6.7
3	8.2	8.1	2.7	6.2
4	9.2	9.2	2.0	3.2

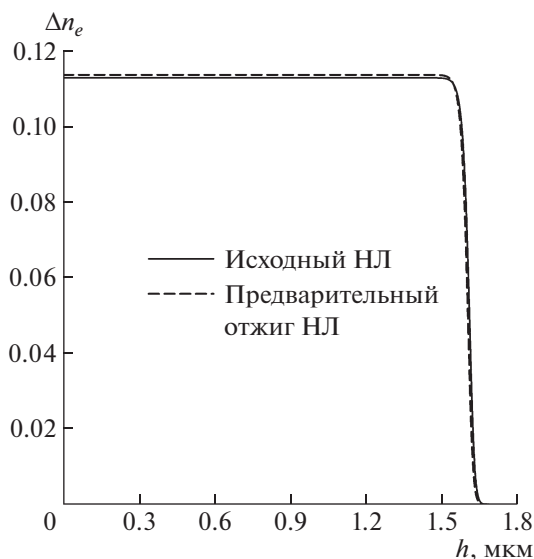


Рис. 3. Профиль показателей преломления волноводов после ПО с предварительным отжигом подложки и без него.

лированные структуры), а не слоя данной фазы. Поскольку для κ_2 -фазы характерны высокие внутренние напряжения, а напряжения для κ_1 -фазы почти на порядок меньше [9], в процессе отжига происходит релаксация напряжений за счет образования некогерентных границ раздела между κ_2 - и κ_1 -фазами. Образование межфазных границ приводит к образованию дополнительных дефектов структуры.

Для визуальной оценки распределения в ПО-слое κ_1 -фазы восстановительный отжиг проводили в два этапа. Сначала все образцы отжигали в течение 6 ч с последующим дополнительным отжигом в течение еще 1.5 ч. На рис. 4 представлены микрофотографии поверхности протонированного НЛ после 6 ч отжига, на которых частицы κ_1 -фазы распределены в ПО-слое, состоящем из α -фазы. Сравнение микрофотографий указывает на меньшее количество выделений κ_1 -фазы на образцах, подвергнутых предварительному отжигу. Следовательно, в данном случае структурно-фазовые превращения происходят с большей скоростью, что может быть обусловлено несколько меньшими напряжениями в поверхностных слоях после ПО благодаря предварительному отжигу образцов.

Деформации кристаллической решетки после восстановительного отжига вычисляли не по смещению линий, а по уширению дифракционных максимумов. Экспериментальная ширина максимума B зависит как от физического уширения b , так и от инструментального уширения φ : $B^2 = b^2 + \varphi^2$. Физическое уширение дифракционных максимумов связано с размером областей когерентного рассеяния через формулу Селякова и деформациями кристаллической решетки. Экспериментально вычисляя брэгговские углы отражения θ_1 и θ_2 и полуширину дифракционных максимумов (FWHM) B_1 и B_2 от двух порядков отражений для НЛ X-среза (110) и (220) соответственно, были рассчитаны деформации

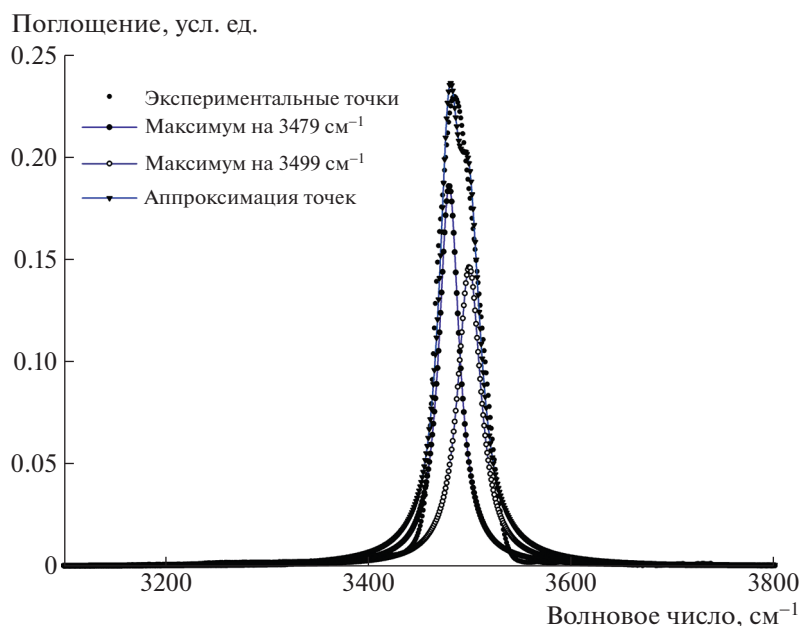


Рис. 4. ИК-спектр гомогенизированного образца НЛ после 7.5 ч постобменного отжига.

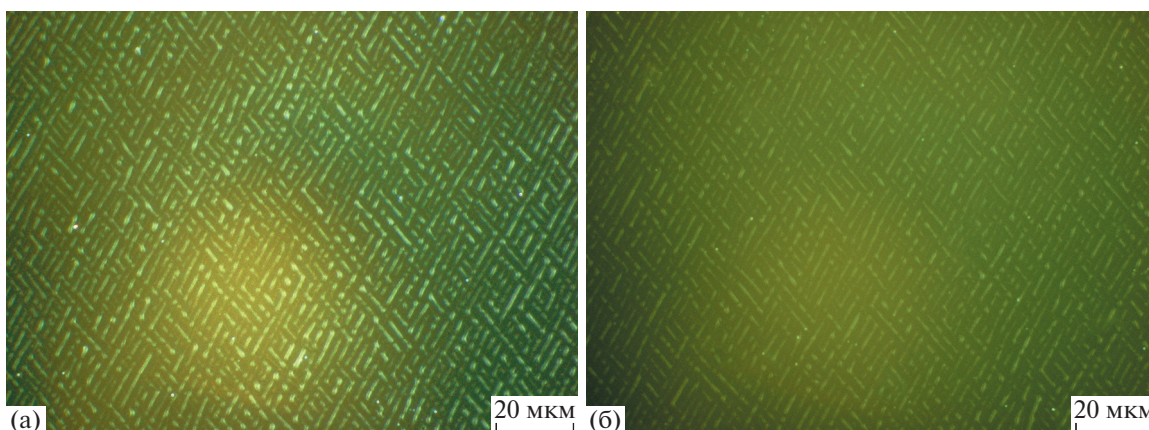


Рис. 5. Поверхность НЛ после 6 ч восстановительного отжига: исходный (а) и после гомогенизирующего предварительного отжига (б).

(по уширению максимумов) кристаллической решетки НЛ по формуле [26]:

$$\epsilon^2 = \frac{cb_1^2 B_2 - b_2^2 B_1}{16 \operatorname{tg}^2 \theta_1 (cB_2 - tB_1)}, \quad (4)$$

где $t = \frac{\operatorname{tg}^2 \theta_2}{\operatorname{tg}^2 \theta_1}$, $c = \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2}$, $b_{1,2}^2 = B_{1,2}^2 - \Phi_{1,2}^2$ (эталона).

В качестве эталона в данной работе использовали пластины НЛ производства Фомос-Материалы в исходном состоянии после поставки без каких-либо дополнительных вмешательств. Дифракционные кривые от второго порядка отражений (220) в данной работе не представлены. В результате расчетов деформации кристаллической решетки составили $\epsilon = 3.1$ и 3.8×10^{-4} для НЛ с гомогени-

зирующим предварительным отжигом и без него соответственно. Полученная разница находится за пределами погрешности измерений, которая составляет ~10%. Таким образом, наблюдается заметное снижение деформаций кристаллической решетки НЛ после восстановительного отжига за счет гомогенизации структуры образцов. На рис. 1 показано, что после восстановительного отжига β -фазы отсутствуют (сплошная линия), но кристаллическая решетка не восстанавливается полностью. Происходит уширение дифракционного максимума кристалла НЛ. Протоны проникают вглубь кристалла, занимая свободные позиции в кристаллической решетке НЛ, формируя высокостабильную α -фазу. Полученные результаты подтверждаются данными ИК-спектроскопии. Неполяризованный широкий максимум при 3252 см^{-1} после восстановительного отжига исчезает (рис. 5), но появляется максимум при 3484 см^{-1} , что по данным [27] соответствует однородной α -фазе.

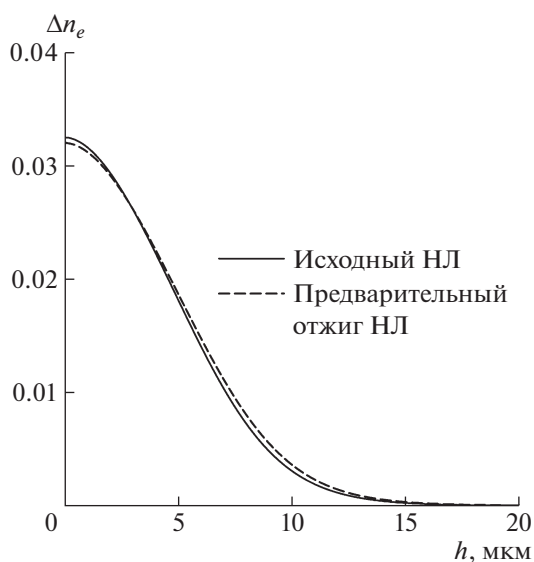


Рис. 6. Профиль показателя преломления волноводов Δn_e после восстановительного отжига.

Известно [28], что форма ямок травления для пластин НЛ X-среза имеет ромбическую форму. В результате влажного селективного травления были выявлены ямки травления (рис. 6) на поверхности X-среза пластин НЛ в виде сильно вытянутых и искаженных ромбов с длинными осями, параллельными кристаллографическому направлению $[01\bar{1}1]$. Искажение формы ямок травления также связано с деформацией кристаллической решетки в приповерхностном слое пластин НЛ. Расчет плотности ямок травления (дислокаций) на поверхности планарного ПО-волновода указывает на снижение с 8×10^4 до $5 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$ после предварительного гомогенизирующего отжига. Таким образом, снижение концентрации протонов в ПО-слоях после предварительного отжига пластин, обнаруженных с помощью рентгеновского анализа, можно объяснить снижением

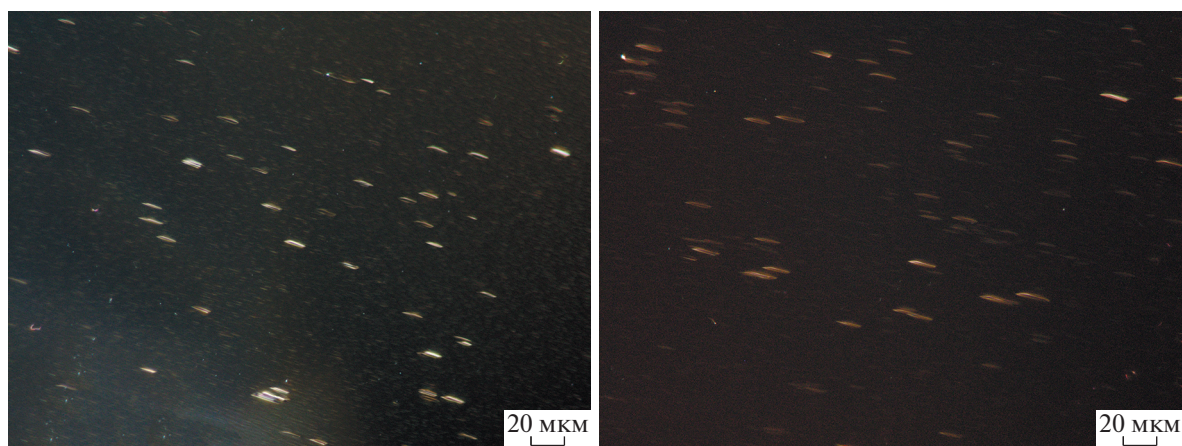


Рис. 7. Ямки травления на поверхности ПО-слоя (α -фаза) на пластинах НЛ до (слева) и после (справа) предварительного отжига в темном поле.

плотности дефектов и дислокаций в приповерхностном слое НЛ. Снижение плотности дефектов и дислокаций приводит в конечном счете к меньшим деформациям $\text{Li}_{1-x}\text{H}_x\text{NbO}_3$ -слоев после постобменного отжига.

По результатам модовой спектроскопии глубина волновода после постобменного отжига увеличивается с 1.6 до 6–7 мкм. При этом для образцов с гомогенизирующим предварительным отжигом наблюдается небольшое снижение Δn_e на поверхности пластин НЛ (рис. 6). Профили показателя преломления имеют градиентное распределение. Наблюдаемое небольшое снижение Δn_e на поверхности НЛ не является критическим, а находится в допустимом технологическом диапазоне. Тем не менее снижение деформаций и, соответственно, числа протонов, находящихся вне кислородных плоскостей в кристаллической решетке НЛ, будет положительно влиять на стабильность работы таких волноводов под действием различных внешних факторов (температура, электрические поля и т.д.). Кроме того, существует проблема дрейфа рабочей точки интегрально-оптических схем, которая со стороны материальных (физических) параметров устройства может быть решена предложенным в данной работе способом. Различные технологические проблемы, связанные со взаимодействием поверхности НЛ и других материалов (металлических электродов, процесса травления, нанесения фоторезиста и т.д.), могут быть решены путем ее гомогенизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы было проведено исследование гомогенизирующего предварительного отжига пластин НЛ на характеристики волноводных структур после ПО и постобменного отжига. Показано, что после ПО образуются β_1 - и β_2 -фазы.

Методом рентгенофазового анализа показано, что гомогенизирующий предварительный отжиг приводит к снижению интегральной интенсивности спектральных компонентов двух β -фаз после ПО. Показано, что после постобменного отжига деформации и плотность дислокаций кристаллической решетки НЛ снижаются для предварительно гомогенизированных образцов.

Данные модовой спектроскопии исследуемых образцов на всех этапах протонного обмена показывают очень близкие результаты. Так как в данной работе исследования проводили на планарных волноводах, то существенные различия могут быть обнаружены для канальных волноводов, что касается их оптических потерь и стабильности работы.

Полученные результаты расширяют понимание процессов, происходящих в ходе протонного обмена и постобменного отжига в зависимости от состояния поверхности кристалла НЛ. Кроме того, полученные результаты имеют практическую ценность при изготовлении стабильных модуляторов фазы и амплитуды излучения для систем навигации, сенсоров и телекоммуникаций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Пермского края, договор № С-26/848 (исследование образцов), и госзадания № 121101300016-2 (изготовление образцов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wooten E., Kissa K., Yi-Yan A. // *Sel. Top. Quant. Electron.* 2000. V. 6. P. 69. <https://doi.org/10.1109/2944.826874>
2. Arizmendi L. // *Phys. Status Solidi.* 2004. V. 201. P. 253. <https://doi.org/10.1002/pssa.200303911>

3. *Suchoski P.G., Findakly T.K., Leonberger F.J.* // Opt. Lett. 1988. V. 13. P. 1050.
<https://doi.org/10.1364/OL.13.001050>
4. *Korkishko Yu.N., Fedorov V.A., Feoktistova O.Y.* // J. Lightwave Technol. 2000. V.18. № 4. P. 562.
5. *Korkishko Yu.N., Fedorov V.A.* // IEEE J. Select. Top. Quant. Electron. 1996. V. 2. № 2. P. 187.
6. *Сосунов А.В., Пономарев Р.С., Мушинский С.С. и др.* // Кристаллография. 2020. Т. 65. № 5. С. 818.
<https://doi.org/10.31857/S0023476120050227>
7. *Yi-Yan A.* // Appl. Phys. Lett. 1983. V. 42. P. 633.
<https://doi.org/10.1063/1.94055>
8. *Vohra S.T., Mickelson A.R., Asher S.E.* // J. Appl. Phys. 1989. V. 66. № 11. P. 5161.
<https://doi.org/10.1063/1.343751>
9. *Коркишко Ю.Н., Федоров В.А.* // Кристаллография. 1999. Т. 44. № 2. С. 271280.
10. *De Micheli M., Botineau J., Neveu S. et al.* // Opt. Lett. 1983. V. 8. № 2. P. 114.
<https://doi.org/10.1364/OL.8.000114>
11. *Bortz M.L., Fejer M.M.* // Opt. Lett. 1991. V. 16. P. 1844.
<https://doi.org/10.1364/OL.16.001844>
12. *Gruber M., Leitner A., Kiener D. et al.* // Mater. Des. 2018. V. 153. P. 221.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.04.082>
13. *Galinetto P., Marinone M., Grando D. et al.* // Opt. Laser Eng. 2007. V. 45. P. 380.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2005.05.007>
14. *Ponomarev R.S., Sosunov A.V., Semenova O.R. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2086. P. 012031.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2086/1/012031>
15. *Mushinsky S., Petukhov I., Kichigin V. et al.* // IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). 2021. P. 283.
<https://doi.org/10.1109/EDM52169.2021.9507647>
16. *Muller H.G., Stapleton A.D., Foran B.J. et al.* // J. Appl. Phys. 2011. V. 110. P. 033539.
<https://doi.org/10.1063/1.3622335>
17. *Sosunov A., Ponomarev R., Semenova O. et al.* // Opt. Mater. 2019. V. 88. P. 176.
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.11.018>
18. *Mushinsky S.S., Petukhov I.V., Permyakova M.A. et al.* // Ferroelectrics. 2019. V. 541:1. P. 105.
<https://doi.org/10.1080/00150193.2019.1574651>
19. *Onodera H., Awai I., Ikenoue J.* // Appl. Opt. 1983. V. 22. P. 1194.
<https://doi.org/10.1364/AO.22.001194>
20. *White J.M., Heidrich P.F.* // Appl. Opt. 1976. V. 15. P. 151.
<https://doi.org/10.1364/AO.15.000151>
21. *Коркишко Ю.Н., Федоров В.А.* // Журн. техн. физики. 1999. Т. 69. № 3. С. 47.
22. *De Micheli M., Li M.J., Ostrowsky D.B. et al.* // J. Lightwave Technol. 1986. V. LT-4. P. 743.
<https://doi.org/10.1109/JLT.1986.1074799>
23. *Herrington J.R., Dischler B., Rauerber A., Schneider J.* // Solid State Commun. 1973. V. 12. P. 351.
[https://doi.org/10.1016/0038-1098\(73\)90771-0](https://doi.org/10.1016/0038-1098(73)90771-0)
24. *Köhler T., Mehner E., Hanzig J. et al.* // J. Solid State Chem. 2016. V. 244. P. 108.
<https://doi.org/10.1016/j.jssc.2016.09.017>
25. *Kuneva M., Christova K., Tonchev S.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2012. V. 398. P. 012047.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/398/1/012047>
26. *Китайгородский А.И.* Рентгеноструктурный анализ. М.; Л.: Гос. изд-во техн.-теор. лит. 1950. 650 с.
27. *Kostritskii S.M., Korkishko Y.N., Fedorov V.A. et al.* // Ferroelectrics Lett. 2020. V. 47: 1–3. P. 9.
<https://doi.org/10.1080/07315171.2020.1799627>
28. *Nassau K., Levinstein H.J., Loiacono G.M.* // J. Phys. Chem. Solids. 1966. V. 27. № 6–7. P. 983.
[https://doi.org/10.1016/0022-3697\(66\)90070-9](https://doi.org/10.1016/0022-3697(66)90070-9)