

УДК 533.924
PACS 52.40.Hf

Экспериментальное исследование показателей преломления тонкоплёночного ниобата лития, модифицированного методом протонного обмена

В. А. Журавлев^{1,2†}, А. А. Норова², А. А. Козлов^{1,2}

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

² ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь

[†] v.a.zhuravlev.perm@gmail.com

Проведено исследование показателей преломления тонкоплёночного ниобата лития (ТНЛ), модифицированного протонным обменом. С целью исследования кинетики процесса протонного обмена варьировалось время процесса. В качестве основных экспериментальных методов исследования использовались метод призмного ввода излучения и метод реактивного ионного травления. Предложен метод определения изменения показателя преломления эпитаксиального слоя $H_xLi_{1-x}NbO_3$, формирующегося на поверхности ТНЛ после протонного обмена. Метод основан на разделении вклада в средний показатель преломления доли $H_xLi_{1-x}NbO_3$ и доли исходной плёнки. Основным предположением является то, что показатель преломления изменяется ступенчато. С помощью метода призмного ввода излучения были получены усреднённые по толщине необыкновенный и обыкновенный показатели преломления. Для разграничения слоев определялся профиль концентрации протонов при помощи профилирования скорости реактивного ионного травления по глубине. Форма концентрационных профилей отличается от профилей, снятых для объёмного НЛ. Из концентрационных профилей была получена глубина протонного обмена и коэффициент диффузии, который составил $0.031 \text{ мкм}^2/\text{час}$, что меньше значений, характерных для объёмного ниобата лития. Было показано, что средние показатели преломления линейно изменяются со временем протонного обмена. В то же время показатели преломления эпитаксиального слоя остаются постоянными. Изменения необыкновенного и обыкновенного показателей преломления, обусловленные протонным обменом, составили 0.8 и -0.5 , соответственно, что совпадает с типичными значениями для β -фаз объёмного ниобата лития.

Ключевые слова: тонкоплёночный ниобат лития; реактивное ионное травление; протонный обмен

Поступила в редакцию 15.04.2026; после рецензии 07.05.2026; принята к опубликованию 11.05.2026

Experimental investigation of the refractive indices of thin-film lithium niobate modified by the proton exchange method

V. A. Zhuravlev^{1,2†}, A. A. Norova², A. A. Kozlov^{1,2}

¹ Perm State University, Perm, Russia

² Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company, Perm, Russia

[†] v.a.zhuravlev.perm@gmail.com

We have studied the refractive indices of thin-film lithium niobate (TFLN) modified by proton exchange. In order to investigate the kinetics of the proton exchange process, the process time was varied. The main experimental research methods used were prism coupling and reactive ion etching. We propose a method for determining the change in the refractive index of the $H_xLi_{1-x}NbO_3$ epitaxial layer formed on the TFLN surface after proton exchange. The method is based on separating the

contribution to the average refractive index of $H_xLi_{1-x}NbO_3$ and of the initial TFLN. The basic assumption was that the refractive index after proton exchange varies stepwise. The thickness-averaged extraordinary and ordinary refractive indices were obtained by means of prism coupling. To distinguish the layers, the proton concentration profile was determined using depth profiling of the reactive ion etching rate. The shape of the concentration profiles differed from the profiles taken for bulk lithium niobate. From the concentration profiles, the depth of proton exchange and the diffusion coefficient were obtained. The diffusion coefficient was $0.031 \text{ mkm}^2/\text{hour}$, which is less than the values typical for bulk lithium niobate. The paper shows that the average refractive indices vary linearly with the time of proton exchange. At the same time, the refractive indices of the epitaxial layer remain constant. The changes in the extraordinary and ordinary refractive indices due to proton exchange were 0.8 and -0.5 respectively, which corresponds to typical values for the β -phases of bulk lithium niobate.

Keywords: thin-film lithium niobate; reactive ion etching; proton exchange

Received 15 April 2026; revised 07 May 2026; accepted 11 May 2026

doi: 10.17072/1994-3598-2026-2-40-48

1. Введение

Тонкоплёночный ниобат лития (ТНЛ) – одна из перспективных материальных платформ для создания фотонных интегральных схем (ФИС). ТНЛ – монокристаллическая тонкая плёнка ниобата лития, полученная на поверхности пластины окисленного кремния методом управляемого скола. На материальной платформе из ТНЛ методами травления могут быть изготовлены оптические волноводы с контрастом показателя преломления, существенно превышающим контраст оптических волноводов, изготовленным традиционными диффузионными технологиями изготовления волноводов на основе объёмного ниобата лития (НЛ). Высококонтрастные волноводы имеют меньшие критические радиусы кривизны и меньший диаметр поля волноводной моды – это позволяет изготавливать ФИС с высокой плотностью интеграции. Высокий электрооптический коэффициент ($r_{33} = 30.9 \text{ пм/В}$ [1]) вкупе с малым диаметром поля моды ($\approx 1.5 \text{ мкм}$ [2]) даёт возможность изготавливать эффективные электрооптические модуляторы фазы и амплитуды с рабочей частотой более 100 ГГц [3].

Один из традиционных методов изготовления ФИС на основе ТНЛ представлен на рис. 1. Он включает стандартные для микроэлектроники процессы, такие как литография, осаждение тонких плёнок, реактивное ионное травление.

Процесс травления НЛ во фторсодержащей плазме осложняется его высокой химической стойкостью: использование химически стойких металлических масок, например, Cr или Ni, приводит к сильной шероховатости боковых стенок и большим потерям на рассеяние в оптических волноводах [4]. В то же время использование диэлектрических или фоторезистивных масок при травлении ТНЛ даёт низкую шероховатость боковых стенок [5], но и низкую селективность травления.

Для решения проблемы низкой селективности травления ТНЛ по маске из SiO_2 был предложен метод предварительной модификации ТНЛ протонным обменом (ПО) [6]. На рис. 2 представлен метод

изготовления ФИС на основе ТНЛ, включающий предварительный протонный обмен. Материал после протонного обмена, в частности – формируемые β -фазы, – обладает малым электрооптическим коэффициентом [7], поэтому этот метод должен включать обратный протонный обмен [8] для восстановления электрооптических свойств.

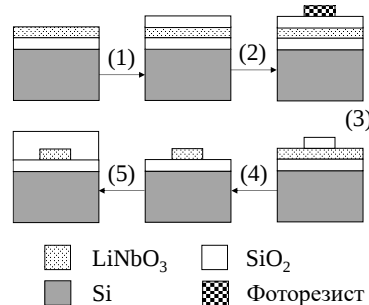


Рис. 1. Традиционный метод изготовления ФИС на основе ТНЛ. (1) – осаждение твердотельной маски, (2) – литография, (3) – травление твердотельной маски, (4) – травление ТНЛ, (5) – осаждение покровного слоя

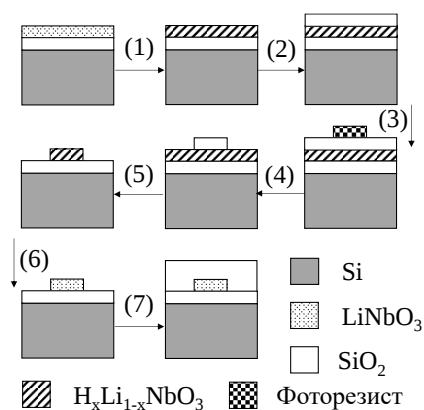


Рис. 2. Метод изготовления ФИС на основе ТНЛ с предварительным протонным обменом. (1) – протонный обмен, (2) – осаждение твердотельной маски, (3) – литография, (4) – травление твердотельной маски, (5) – травление ТНЛ, (6) – обратный протонный обмен, (7) – осаждение покровного слоя

Ранее было показано, что каналные волноводы, изготовленные таким методом, обладают повышенными оптическими потерями величиной 3 дБ/см [9]. По этой причине исследование процесса протонного обмена в ТНЛ, структуры и оптических свойств ТНЛ, модифицированного методом протонного обмена, необходимо для минимизации этих потерь.

Целью данной работы является применение метода реактивного ионного травления для исследования свойств тонкоплёночного ниобата лития после модификации протонным обменом. В данной работе также будут обсуждаться методы исследования показателя преломления ПО объёмного ниобата лития и их применимость к исследованию ПО тонкоплёночного ниобата лития.

2. Экспериментальные методы исследования

2.1. Подготовка образцов

В качестве образцов были использованы части пластины 15:15 мм² ТНЛ X-среза (NanoLN) с толщиной плёнки равной 700 нм. Поперечное сечение исходной пластины изображено на рис. 3. ПО проводился в расплаве бензойной кислоты в титановом реакторе. Температура процесса составляла 175 °С, скорость нагрева до заданной температуры – 1.5 °С/мин. Время протонного обмена варьировалось от 20 до 120 минут. После протонного обмена образцы исследовались с помощью метода призмного ввода и профилирования скорости реактивного ионного травления по глубине.



Рис. 3. Структура подложки тонкоплёночного ниобата лития до протонного обмена

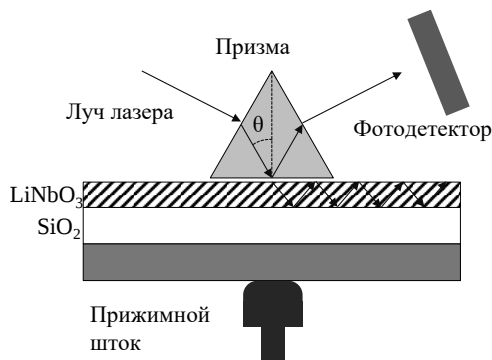


Рис. 4. Ход лучей при реализации метода призмного ввода для исследования тонких плёнок

2.2. Метод призмного ввода

Метод основан на вводе оптического излучения в исследуемую плёнку с помощью призмного элемента связи. Схематично геометрия задачи представлена на рис. 4.

Исследуемый образец прижимается к призме с малым воздушным зазором при помощи пневматического штока. Луч лазера, попадает на призму, преломляется в ней, отражается от основания и попадает в фотодетектор. При некоторых фиксированных углах падения θ происходит нарушение полного внутреннего отражения, и излучение начинает распространяться в плёнке в виде волноводной моды. Построенная зависимость интенсивности на фотодетекторе от угла θ позволяет определить показатель преломления и толщину исследуемой плёнки с помощью дисперсионного уравнения

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_i L \cos(\theta') + \psi_{10} + \psi_{21} = m\pi, \quad (2.1)$$

где λ – длина волны, n_i равен n_e или n_o в зависимости от ориентации пластины и поляризации используемого излучения (рис. 5), L – толщина плёнки ТНЛ, ψ_{10} и ψ_{21} – френелевские сдвиги фаз на границах раздела «воздух–плёнка ниобата лития» и «плёнка ниобата лития–SiO₂», соответственно; m – порядок волноводной моды. θ' – угол преломления в плёнке ТНЛ, связанный с углом θ как $n_{\text{eff}}(m) \cdot \sin \theta' = n_{\text{SiO}_2} \cdot \sin \theta$. $n_{\text{eff}}(m)$ – эффективный показатель преломления волноводной моды порядка m . В общем случае, неизвестными величинами являются n_i и L , поэтому для их определения необходимо получение экспериментальных значений $n_{\text{eff}}(m)$ для нескольких волноводных мод, например, $m = 0$ (фундаментальная мода) и $m = 1$. В случае, если известна толщина плёнки, возможно определение показателей преломления n_i по одной волноводной моде.

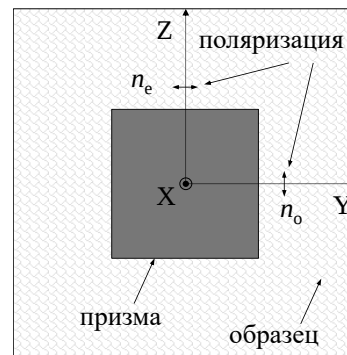


Рис. 5. Схема измерения показателей преломления (вид сверху)

Так как ниобат лития является одноосным кристаллом, то возможно определение как необыкновенного, так и обыкновенного показателя преломления. С учетом того, что в данной работе исследуется ТНЛ X-среза, при использовании гори-

зонтальной поляризации (ТЕ) обыкновенный показатель преломления будет измеряться при распространении излучения вдоль оси Z, а необыкновенный – вдоль оси Y (рис. 5).

Для исследования процесса ПО в НЛ широко применяется метод модовой спектроскопии. При проведении ПО на поверхности кристалла НЛ происходит эпитаксиальный рост твёрдого раствора $H_xLi_{1-x}NbO_3$, n_e которого больше, чем у исходного $LiNbO_3$. Величина n_o уменьшается. По этой причине ПО волноводы поддерживают распространение только горизонтальной поляризации в случае Х-среза. При достаточно больших толщинах эпитаксиального слоя возможно его исследование как волноводного.

Большое количество экспериментальных данных о ходе протонного обмена было получено с помощью метода модовой спектроскопии [10]. После ПО в бензойной кислоте в НЛ формируются волноводы со ступенчатым распределением показателя преломления. Профиль получают при помощи обратного метода ВКБ [11]. Необходимое условие для применения метода – монотонно убывающий от поверхности в глубину показатель преломления. Также необходимы как минимум три волноводные моды, то есть достаточно большая толщина исследуемого слоя. Оценить количество волноводных мод можно по дисперсионному соотношению (2.1).

В случае исследования ПО в НЛ, при длине волны источника излучения $\lambda = 633$ нм и толщине ПО слоя $L \geq 2$ мкм, это не является проблемой. Так, после ПО типичное изменение необыкновенного показателя преломления $\Delta n_e \sim 0.7$ и допустимо существование трёх-четырёх волноводных мод.

В случае тонкоплёночного ниобата лития, если толщина эпитаксиального слоя будет равна толщине плёнки ниобата лития, то есть если протонный обмен пройдёт на всю глубину плёнки (700 нм), при той же длине волны существует три волноводные моды.

При меньших толщинах слоя невозможно разделить волноводные моды $H_xLi_{1-x}NbO_3$ и исходной нижележащей плёнки $LiNbO_3$, поэтому и невозможно напрямую из дисперсионного соотношения определить Δn_e в ТНЛ.

Оценить изменение показателя преломления в ТНЛ после протонного обмена на глубину меньшую, чем толщина плёнки, можно из следующих соображений. Измеряемый показатель преломления является неким эффективным показателем преломления, характеризующим всю плёнку целиком. То есть, с помощью метода призмного ввода мы получаем усреднённый по толщине показатель преломления $n_{i \text{ средн}}$. Рассмотрим распределение показателя преломления в ТНЛ после протонного обмена на глубину l_0 (рис. 6). Средний показатель преломления в этом случае определяется через функцию распределения показателя преломления $n_i(l)$ как

$$n_{i \text{ средн}} = \frac{1}{L} \int_0^L n_i(l) dl. \quad (2.2)$$

Если предположить, что показатель преломления изменяется ступенчато (рис. 7), как в объёмном ниобате лития, то это выражение упрощается до

$$n_{i \text{ ПО}} = \frac{L}{l_0} n_{i \text{ средн}} - \left(\frac{L}{l_0} - 1 \right) \cdot n_{i \text{ ТНЛ}}, \quad (2.3)$$

где $n_{i \text{ ТНЛ}}$ – показатель преломления в исходном ТНЛ, $n_{i \text{ ПО}}$ – искомый показатель преломления после ПО.

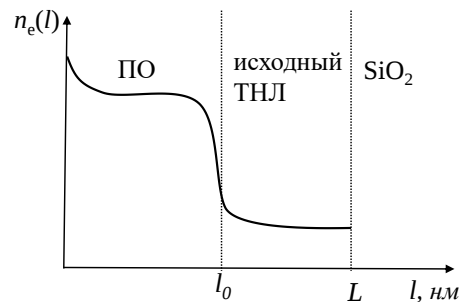


Рис. 6. К определению показателя преломления ТНЛ после протонного обмена

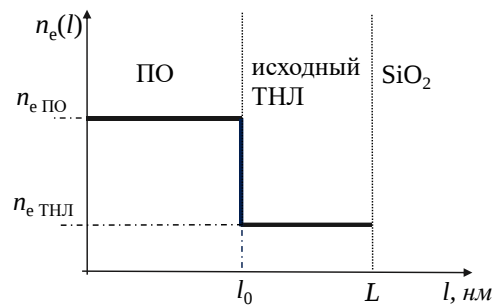


Рис. 7. Предполагаемое распределение показателя преломления ТНЛ после протонного обмена

Этим способом возможно определение как необыкновенного, так и обыкновенного показателя преломления после ПО.

2.3. Метод профилирования скорости травления по глубине

Во время протонного обмена, часть ионов H^+ замещают Li^+ в решётке, часть ионов также может внедряться в междоузлия. Это приводит к увеличению свободной энергии кристалла НЛ на величину $\Delta F = \Delta F_{\text{м.у.}} + \Delta F_z$, где $\Delta F_{\text{м.у.}}$, ΔF_z – приращения свободной энергии за счёт внедрения междоузельных атомов и дефектов замещения, соответственно. Величину приращения свободной энергии можно оценить [12], как

$$\Delta F_j = n_j E_j - kT [N \ln N - (N - n_j) \ln (N - n_j) - n_j \ln n_j] - n_j TS_j, \quad (2.4)$$

где n_j – количество дефектов типа j , E_j – энергия образования дефекта типа j ($E_{м.у.} > 1.01$ эВ, $E_{з.} \approx 1.25$ эВ [13]), N – число атомов в кристалле, S_j – колебательная энтропия одного дефекта типа j . По сравнению с исходным LiNbO_3 у $\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$ свободная энергия выше, что приводит к повышенной химической активности и более высокой скорости травления.

Этим эффектом можно воспользоваться, чтобы определить распределение концентрации протонов в ТНЛ после протонного обмена, которое должно коррелировать с распределением скорости травления по глубине. В рамках данной работы предполагается, что скорость травления линейно коррелирует с концентрацией протонов в плёнке, поэтому термин «концентрационный профиль» будет применяться к профилю скорости реактивного ионного травления по глубине.

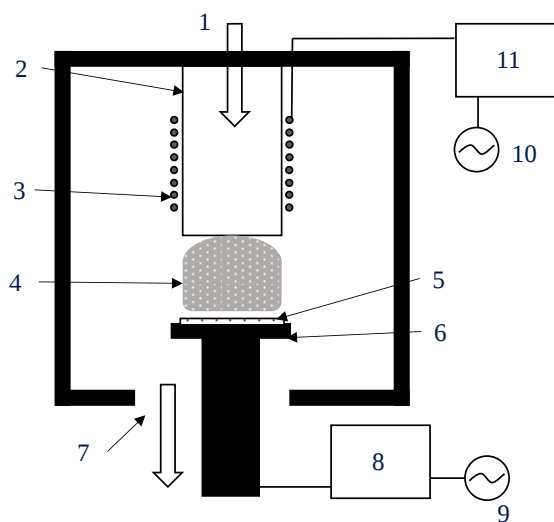


Рис. 8. Метод реактивного ионного травления: (1) – система ввода рабочих газов, (2) – кварцевая труба, (3) – индуктор, (4) – плазменное облако, (5) – образец, (6) – столик-держатель, (7) – система откачки, (8) – устройство согласования ёмкостно-связанной плазмы, (9) – источник ёмкостно-связанной плазмы 13.56 МГц, 10 – источник индуктивно-связанной плазмы 13.56 МГц, 11 – устройство согласования индуктивно-связанной плазмы

Для реализации был выбран метод реактивного ионного травления (РИТ) во фторсодержащей плазме на установке плазмохимического травления «Этна-100», схема установки представлена на рис. 8. В качестве рабочих газов использовалась смесь Ar и SF_6 в соотношении потоков 38:2 $\text{см}^3/\text{мин}$. Давление процесса составляло 5 Па. Мощность источников индуктивно-связанной и ёмкостно-связанной плазмы составляли 500 Вт и 150 Вт соответственно. Время обработки образцов в плазме варьировалось от 15 до 90 с для сохранения оптимальной точности измерения скорости травления. Скорость измерялась как разница толщины плёнки до и после травления, делённая на время обработки в плазме. Измерение толщины проводи-

лось методом спектральной рефлектометрии. Погрешность измерения толщины составляла 2 нм. Погрешность определения скорости травления рассчитывалась как отношение погрешности определения толщины ко времени обработки образцов.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

3.1. Зависимость показателей преломления ТНЛ от времени протонного обмена

До процесса протонного обмена для всех образцов проводилось измерение показателей преломления исходных плёнок ниобата лития на длине волны $\lambda = 1.539$ мкм методом призменного ввода (раздел 2.2). Получены усреднённые по серии образцов значения $n_e = 2.1401$, $n_o = 2.2097$. Погрешность не превышала 0.01 для n_e и для n_o . Свой вклад в погрешность измерения вносили неоднородность толщины плёнки, неоднородность состава (стехиометрии) по площади образца и рассогласование между направлением распространения излучения и кристаллографическими осями образца. В дальнейшем, для частичной компенсации погрешности, Δn_e и Δn_o рассчитывались от средних по всем образцам значений.

После проведения процесса протонного обмена для всех образцов также были определены показатели преломления. Результаты измерений представлены на рис. 9.

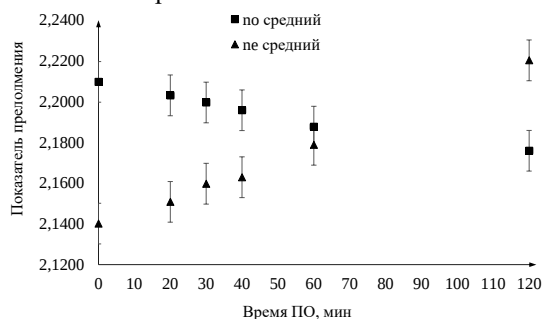


Рис. 9. Зависимость показателей преломления от времени протонного обмена

Средний по толщине плёнки необыкновенный показатель преломления $n_{e, \text{средн}}$ с увеличением времени протонного обмена растёт, средний обыкновенный показатель преломления $n_{o, \text{средн}}$ уменьшается. Стоит заметить, что показатели преломления после 60 мин протонного обмена равны друг другу с учётом предела погрешности, что может означать, что плёнка стала оптически изотропной.

3.2. Профиль скорости реактивного ионного травления в зависимости от времени протонного обмена

Перед процессом протонного обмена измерялась скорость травления у исходного образца. Скорость травления составила 0.15 ± 0.05 нм/с и не изменялась с увеличением глубины травления.

После проведения процесса протонного обмена для всех образцов были сняты зависимости скорости травления от глубины. На рис. 10–14 приведены такие зависимости для времени протонного обмена от 20 до 120 мин. Съёмка профиля скорости РИТ оканчивалась при скорости травления, характерной для травления исходного немодифицированного ТНЛ.

Сразу после протонного обмена в объёмном ниобате лития формируется ступенчатый профиль распределения протонов. Причина отличия формы профиля концентрации протонов в тонкой плёнке ниобата лития в сравнении с объёмным ниобатом лития неизвестна. Предположительно, влияет повышенная плотность дефектов в приповерхностном слое, показанная в работе [14].

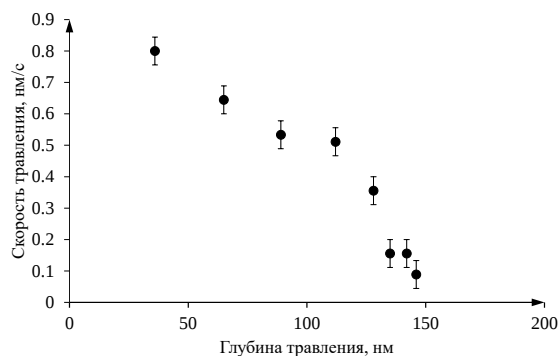


Рис. 10. Профиль скорости РИТ тонкой плёнки ниобата лития по глубине после ПО 20 мин

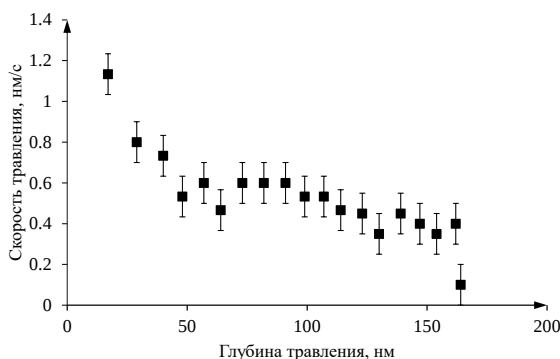


Рис. 11. Профиль скорости РИТ тонкой плёнки ниобата лития по глубине после ПО 30 мин

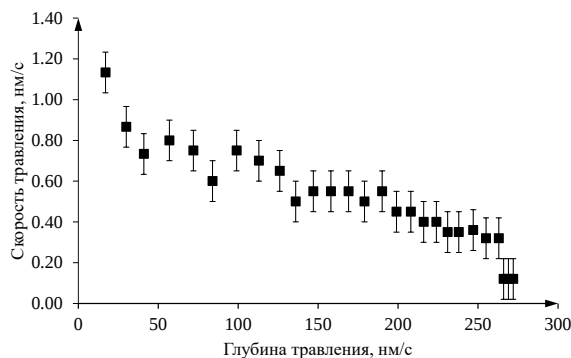


Рис. 12. Профиль скорости РИТ тонкой плёнки ниобата лития по глубине после ПО 40 мин

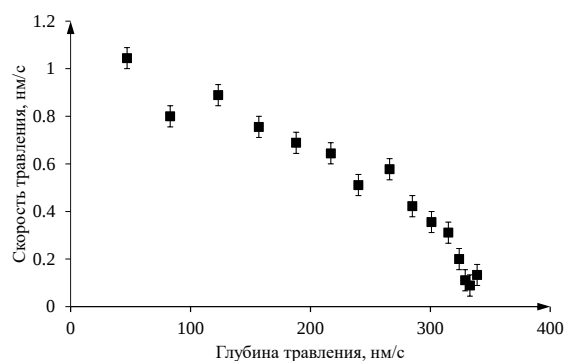


Рис. 13. Профиль скорости РИТ тонкой плёнки ниобата лития по глубине после ПО 60 мин

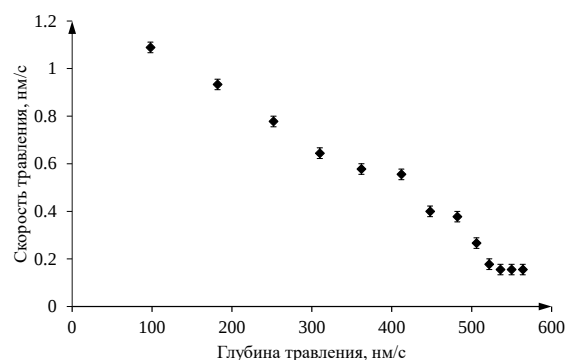


Рис. 14. Профиль скорости РИТ тонкой плёнки ниобата лития по глубине после ПО 120 мин

Глубина протонного обмена определялась как глубина травления, на которой скорость травления не отличалась от скорости травления исходного ТНЛ. Из полученных значений глубин ПО d был определён коэффициент диффузии протонов в ТНЛ как

$$D = d^2 / t, \quad (3.1)$$

где t – время протонного обмена.

Экспериментальные точки и диффузионная кривая для ТНЛ с аппроксимированным по формуле (3.1) коэффициентом диффузии построена на рис. 15. Для сравнения добавлена диффузионная кривая для объёмного ниобата лития с коэффициентами диффузии $0.125 \text{ мкм}^2/\text{час}$ [15] и $0.081 \text{ мкм}^2/\text{час}$ [16]. Учёт нелинейности диффузии, влияющей на профиль концентрации протонов, приведён в работах [16] и [17].

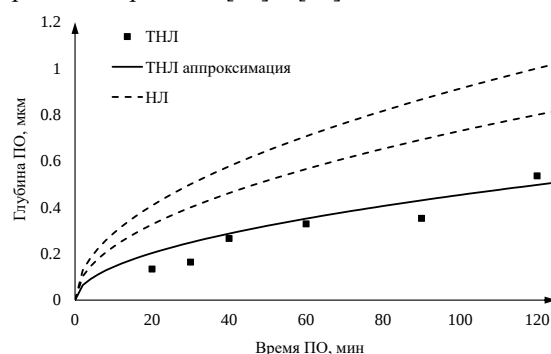


Рис. 15. К определению коэффициента диффузии

Коэффициент диффузии для ТНЛ составил $0.031 \text{ мкм}^2/\text{час}$, что несколько меньше значений, характерных для Х-среза объёмного НЛ.

3.3. Изменение показателей преломления в ходе протонного обмена

Для определения фазового состава получаемых ПО фаз тонкоплёночного ниобата лития необходима информация об изменении показателей преломления в эпитаксиальном слое по сравнению с исходным ТНЛ. Полученные значения средних показателей преломления из раздела 3.1 и глубины протонного обмена из раздела 3.2 позволяют определить это изменение по формуле (2.3). Результат представлен на рисунке 16.

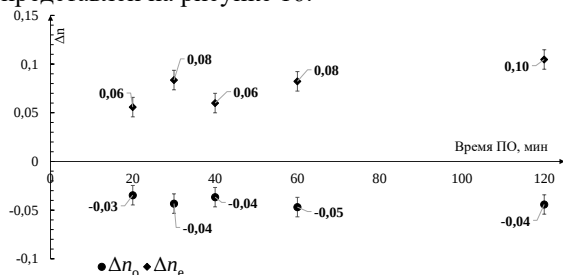


Рис. 16. К определению показателей преломления эпитаксиального слоя $H_xLi_{1-x}NbO_3$ в тонкоплёночном ниобате лития

Средние значения изменения необыкновенного и обыкновенного показателя преломления составили 0.076 и -0.04 , соответственно. С учётом погрешности измерения показателя преломления и глубины протонного обмена, эти значения совпадают с типичными значениями для β -фаз в объёмном ниобате лития [18].

4. Заключение

Выполнено экспериментальное исследование показателей преломления тонкоплёночного ниобата лития после модификации протонным обменом. Метод призмного ввода излучения показал, что средние по толщине показатели преломления ТНЛ линейно зависят от времени протонного обмена.

С помощью метода реактивного ионного травления были определены профили концентрации протонов после протонного обмена. Концентрационные профили сильно отличаются от профилей, наблюдаемых в объёмном ниобате лития. Коэффициент диффузии меньше значений, характерных для объёмного ниобата лития.

В то же время изменения показателей преломления, определённые из глубины протонного обмена и среднего показателя преломления, близки к значениям в β -фазах для объёмного ниобата лития. Причиной отличия хода протонного обмена в ТНЛ и в объёмном НЛ может являться повышенная дефектность, обусловленная способом изготовления ТНЛ.

Авторы выражают благодарность ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» (ПАО «ПНППК») и лично А. Г. Андрееву и А. А. Журавлёву за оказанную помощь при проведении исследований.

Список литературы

1. Weis R. S., Gaylord T. K. Lithium niobate: Summary of physical properties and crystal structure // *Applied Physics A*. 1985. Vol. 37, № 4. P. 191–203. DOI: 10.1007/BF00614817
2. Krasnokutska I., Tambasco J. L. J., Peruzzo A. Nanostructuring of LNOI for efficient edge coupling // *Optics Express*. 2019. Vol. 27, № 12. P. 16578–16585. DOI: 10.1364/OE.27.016578
3. Mercante A. J., Shi S., Yao P., Xie L., Weikle R. M., Prather D. W. Thin film lithium niobate electro-optic modulator with terahertz operating bandwidth // *Optics Express*. 2018. Vol. 26, № 11. P. 14810–14816. DOI: 10.1364/OE.26.014810
4. Shen B., Hu D., Dai C., Yu X., Tan X., Sun J., Jiang J., Jiang A. Advanced etching techniques of $LiNbO_3$ nanodevices // *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13, № 20, 2789.
5. Kumar C. H., Klimov N. N., Kuo P. S. Optimization of waveguide fabrication processes in lithium-niobate-on-insulator platform // *AIP Advances*. 2024. Vol. 14, 065317. DOI: 10.1063/6.0003522.
6. Козлов А. А., Салгаева У. О., Журавлев В. А., Волынец А. Б. Исследование кинетики реактивного ионного травления тонкоплёночного ниобата лития во фторсодержащей плазме // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2024. №. 1. С. 56–71. DOI: 10.17072/1994-3598-2024-1-56-71
7. Bortz M. L., Eyres L. A., Fejer M. M. Depth profiling of the d33 nonlinear coefficient in annealed proton exchanged $LiNbO_3$ waveguides // *Applied Physics Letters*. 1993. Vol. 62, № 17. P. 2012–2014.
8. Korkishko Y. N., Fedorov V. A., Morozova T. M., Caccavale F., Gonella F., Segato F. Reverse proton exchange for buried waveguides in $LiNbO_3$ // *Journal of the Optical Society of America A*. 1998. Vol. 15, № 7. P. 1838–1842.
9. Vetoshkin M. A., Voblikov E. D., Zhuravlev V. A., Bulatova A. V., Moskalev D. N., Kozlov A. A., Salgaeva U. O., Krishtop V. V. Methods of measurement propagation losses in thin film lithium niobate waveguides // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2025. Vol. 89, Suppl. 4. P. S578–S585. DOI: 10.1134/S1062873825714965
10. Korkishko Y. N., Fedorov V. A. Structural phase diagram of $H_x/Li_{1-x}NbO_3$ waveguides: The correlation between optical and structural properties // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2002. Vol. 2, № 2. P. 187–196. DOI: 10.1109/2944.577359

11. Ulrich R., Torge R. Measurement of thin film parameters with a prism coupler // *Applied Optics*. 1973. Vol. 12, № 12. P. 2901–2908.
12. Новиков И. И. Дефекты кристаллического строения металлов. М.: Металлургия, 1983. 232 с.
13. Nahm H. H., Park C. H. Microscopic structure of hydrogen impurity in LiNbO_3 // *Applied Physics Letters*. 2001. Vol. 78, № 24. P. 3812–3814. DOI: 10.1063/1.1376667
14. Козлов А. А., Салгаева У. О., Петухов И. В., Жুরавлев В. А., Вольинцев А. Б. Исследование процесса вторичной конденсации LiF в ходе реактивного ионного травления тонкоплёночного ниобата лития во фторсодержащей плазме // Вестник Пермского университета. Физика. 2024. №. 2. С. 33–55. DOI: 10.17072/1994-3598-2024-2-33-55
15. Dörrer L., Tuchel P., Hüger E., Heller R., Schmidt H. Hydrogen diffusion in proton-exchanged lithium niobate single crystals // *Journal of Applied Physics*. 2021. Vol. 129, 135105. DOI: 10.1063/5.0047606
16. Vohra S. T., Mickelson A. R., Asher S. E. Diffusion characteristics and waveguiding properties of proton-exchanged and annealed LiNbO_3 channel waveguides // *Journal of Applied Physics*. 1989. Vol. 66, № 11. P. 5161–5174. DOI: 10.1063/1.343751
17. Demin V. A., Petukhov M. I., Sosunov A. V., Volyntsev A. B. On the nature of transport phenomena during proton exchange technological process // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2025. Vol. 89, Suppl. 3. P. S358–S363. DOI: 10.1134/S1062873825714643.
18. Cai L., Kang Y., Hu H. Electric-optical property of the proton exchanged phase modulator in single-crystal lithium niobate thin film // *Optics Express*. 2016. Vol. 24, № 5. P. 4640–4647. DOI:10.1364/OE.24.004640
19. Ulrich R., Torge R. Measurement of thin film parameters with a prism coupler. *Applied Optics*, 1973, vol. 12, no. 12, pp. 2901–2908.
20. Novikov I. I. *Defekty kristallicheskogo stroeniia metallov* [Defects in the crystal structure of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1983. 232 pp. (In Russian).
21. Nahm H. H., Park C. H. Microscopic structure of hydrogen impurity in LiNbO_3 . *Applied Physics Letters*, 2001, vol. 78, no. 24, pp. 3812–3814. DOI: 10.1063/1.1376667
22. Kozlov A. A., Salgaeva U. O., Petukhov I. V., Zhuravlev V. A., Volyntsev A. B. The investigation of the LiF redeposition process during reactive ion etching of thin-film lithium niobate with fluorine plasma. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2024, no. 2, pp. 33–55. doi: 10.17072/1994-3598-2024-1-33-55
23. Dörrer L., Tuchel P., Hüger E., Heller R., Schmidt H. Hydrogen diffusion in proton-exchanged lithium niobate single crystals. *Journal of Applied Physics*, 2021, vol. 129, no. 13, DOI:10.1063/ 5.0047606
24. Vohra S. T., Mickelson A. R., Asher S. E. Diffusion characteristics and waveguiding properties of proton-exchanged and annealed LiNbO_3 channel waveguides. *Journal of Applied Physics*, 1989, vol. 66, no. 11, pp. 5161–5174. DOI: 10.1063/1.343751
25. Kumar C. H., Klimov N. N., Kuo P. S. Optimization of waveguide fabrication processes in lithium-niobate-on-insulator platform. *AIP Advances*, 2024, vol. 14, no. 6. DOI: 10.1063/6.0003522.
26. Kozlov A. A., Salgaeva U. O., Zhuravlev V. A., Volyntsev A. B. The study of the kinetics of thin-film lithium niobate reactive ion etching in a fluorine-containing plasma. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2024, no. 1, pp. 56–71. DOI: 10.17072/ 1994-3598-2024-1-56-71 (In Russian).
27. Bortz M. L., Eyres L. A., Fejer M. M. Depth profiling of the d33 nonlinear coefficient in annealed proton exchanged LiNbO_3 waveguides. *Applied Physics Letters*, 1993, vol. 62, no. 17, pp. 2012–2014.
28. Korkishko Y. N., Fedorov V. A., Morozova T. M., Caccavale F., Gonella F., Segato F. Reverse proton exchange for buried waveguides in LiNbO_3 . *Journal of the Optical Society of America A*, 1998, vol. 15, no. 7, pp. 1838–1842.
29. Vetoshkin M. A., Voblikov E. D., Zhuravlev V. A., Bulatova A. V., Moskalev D. N., Kozlov A. A., Salgaeva U. O., Krishtop V. V. Methods of measurement propagation losses in thin film lithium niobate waveguides. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2025, vol. 89, no. 4, pp. 578–585. DOI: 10.1134/ S1062873825714965
30. Korkishko Y. N., Fedorov V. A. Structural phase diagram of $\text{H}_x/\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$ waveguides: The correlation between optical and structural properties. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, vol. 2, no. 2, pp. 187–196. DOI: 10.1109/2944.577359
31. Ulrich R., Torge R. Measurement of thin film parameters with a prism coupler. *Applied Optics*, 1973, vol. 12, no. 12, pp. 2901–2908.
32. Novikov I. I. *Defekty kristallicheskogo stroeniia metallov* [Defects in the crystal structure of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1983. 232 pp. (In Russian).
33. Nahm H. H., Park C. H. Microscopic structure of hydrogen impurity in LiNbO_3 . *Applied Physics Letters*, 2001, vol. 78, no. 24, pp. 3812–3814. DOI: 10.1063/1.1376667
34. Kozlov A. A., Salgaeva U. O., Petukhov I. V., Zhuravlev V. A., Volyntsev A. B. The investigation of the LiF redeposition process during reactive ion etching of thin-film lithium niobate with fluorine plasma. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2024, no. 2, pp. 33–55. doi: 10.17072/1994-3598-2024-1-33-55
35. Dörrer L., Tuchel P., Hüger E., Heller R., Schmidt H. Hydrogen diffusion in proton-exchanged lithium niobate single crystals. *Journal of Applied Physics*, 2021, vol. 129, no. 13, DOI:10.1063/ 5.0047606
36. Vohra S. T., Mickelson A. R., Asher S. E. Diffusion characteristics and waveguiding properties of proton-exchanged and annealed LiNbO_3 channel waveguides. *Journal of Applied Physics*, 1989, vol. 66, no. 11, pp. 5161–5174. DOI: 10.1063/1.343751

References

1. Weis R. S., Gaylord T. K. Lithium niobate: Summary of physical properties and crystal structure. *Applied Physics A*, 1985, vol. 37, no. 4, pp. 191–203. DOI: 10.1007/BF00614817
2. Krasnokutskaya I., Tambasco J. L. J., Peruzzo A. Nanostructuring of LNOI for efficient edge coupling. *Optics Express*, 2019, vol. 27, no. 12, pp. 16578–16585. DOI: 10.1364/OE.27.016578
3. Mercante A. J., Shi S., Yao P., Xie L., Weikle R. M., Prather D. W. Thin film lithium niobate electro-optic modulator with terahertz operating bandwidth. *Optics Express*, 2018, vol. 26, no. 11, pp. 14810–14816. DOI: 10.1364/OE.26.014810
4. Shen B., Hu D., Dai C., Yu X., Tan X., Sun J., Jiang J., Jiang A. Advanced etching techniques of LiNbO_3 nanodevices. *Nanomaterials*, 2023, vol. 13, no. 20, 2789.

17. Demin V. A., Petukhov M. I., Sosunov A. V., Vol-yntsev A. B. On the nature of transport phenomena during proton exchange technological process. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2025, vol. 89, suppl. 3, pp. S358–S363. DOI: 10.1134/S1062873825714643.
18. Cai L., Kang Y., Hu H. Electric-optical property of the proton exchanged phase modulator in single-crystal lithium niobate thin film. *Optics Express*, 2016, vol. 24, no. 5, pp. 4640–4647. DOI:10.1364/OE.24.004640

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Журавлев В. А., Норова А. А., Козлов А. А. Экспериментальное исследование показателей преломления тонкоплёночного ниобата лития, модифицированного методом протонного обмена // Вестник Пермского университета. Физика. 2026. № 2. С. 40–48. doi: 10.17072/1994-3598-2026-2-40-48

Please cite this article in English as:

Zhuravlev V. A., Norova A. A., Kozlov A. A. Experimental investigation of the refractive indices of thin-film lithium niobate modified by the proton exchange method. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2026, no. 2, pp. 40–48. doi: 10.17072/1994-3598-2026-2-40-48

Сведения об авторах

1. Журавлев Владимир Андреевич, аспирант, Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15; инженер-исследователь, ПАО Пермская научно-производственная приборостроительная компания, 614002, Пермь, ул. 25 Октября, 106.
2. Норова Анна Андреевна, инженер-технолог, ПАО Пермская научно-производственная приборостроительная компания, 614002, Пермь, ул. 25 Октября, 106.
3. Козлов Андрей Андреевич, к.ф.-м.н., доцент, Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15; начальник лаборатории, ПАО Пермская научно-производственная приборостроительная компания, 614002, Пермь, ул. 25 Октября, 106.

Author information

1. Vladimir A. Zhuravlev, Postgraduate Student, Institute of Physics and Mathematics, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia; Research Engineer, Perm Scientific-Industrial Instrument-Making Company (PNPPK), PAO (PJSC); 106, 25 Oktyabrya st., Perm, 614002, Russia
2. Anna A. Norova, Process Engineer, Perm Scientific-Industrial Instrument-Making Company (PNPPK), PAO (PJSC); 106, 25 Oktyabrya st., Perm, 614002, Russia
3. Andrei A. Kozlov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia; Laboratory Head, Perm Scientific-Industrial Instrument-Making Company (PNPPK), PAO (PJSC); 106, 25 Oktyabrya st., Perm, 614002, Russia