

# Оптимизация технологии изготовления канальных протонообменных волноводов в кристаллах ниобата лития

И.В.Ильичев, А.С.Козлов, П.В.Гаенко, А.В.Шамрай

*Экспериментально исследовано влияние технологических параметров на профиль волноводной моды в канальных волноводах в кристаллах ниобата лития, изготовленных методом низкотемпературного протонно-ионного обмена. Разработана теоретическая модель процесса формирования волновода, с использованием которой проведен численный расчет профиля волноводной моды для различных технологических параметров. Определены технологические параметры низкотемпературного протонного обмена, обеспечивающие высокие электрооптические характеристики волноводов и устойчивость к погрешностям изготовления. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации характеристик интегрально-оптических устройств и оптимизации их стыковки с различными типами волоконных световодов.*

**Ключевые слова:** интегральная оптика, протонно-ионный обмен, ниобат лития.

## 1. Введение

Ниобат лития находит широкое применение в интегральной оптике благодаря своим электрооптическим, акустооптическим, пьезоэлектрическим и фоторефрактивным свойствам. Одним из основных методов формирования оптических волноводов в кристаллах ниобата лития для изготовления интегрально-оптических устройств является метод низкотемпературного протонно-ионного обмена с последующим отжигом [1]. Суть данного метода заключается в следующем. При взаимодействии подложки  $\text{LiNbO}_3$  с расплавом органических или неорганических кислот при температуре 180–250 °С происходит частичное замещение ионов лития на протоны в поверхностном слое подложки. Результатом этого является увеличение необыкновенного показателя преломления ниобата лития  $n_e$  на  $\sim 10^{-1}$  и уменьшение обыкновенного показателя преломления  $n_o$  на  $10^{-2}$ , что приводит к образованию вблизи поверхности волноводного слоя, поддерживающего распространение оптического излучения необыкновенной поляризации [2]. Этот слой с повышенной концентрацией ионов водорода ( $\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$ ) имеет ступенчатый геометрический профиль и характеризуется относительно высокой ( $0.5 < x < 0.7$ ) степенью обмена (кристаллографические фазы  $\beta_1, \beta_2, \dots$ ) [3]. Образование волноводов сопровождается деградацией электрооптических свойств ниобата лития в волноводной области [4].

Последующий после протонно-ионного обмена дополнительный отжиг при температуре 300–400 °С в отсутствие источника протонов приводит к диффузионному размыванию области с повышенной концентрацией ионов водорода вглубь кристаллической подложки. Од-

новременно с этим происходят структурные фазовые переходы в результате снижения локальной концентрации ионов. Таким образом, формируется волновод с градиентным геометрическим профилем и относительно низкой концентрацией протонов ( $x < 0.4$ ) (фазы  $\alpha, k_1, k_2$ ). Полученный после дополнительного отжига волноводный слой характеризуется изменениями показателей преломления относительно подложки  $\Delta n_e \approx 10^{-2}$  и  $\Delta n_o \approx -10^{-3}$ , причем в волноводном слое происходит восстановление электрооптических свойств ниобата лития [5]. Подробные исследования кристаллографических фаз и структурных фазовых переходов в протонообменных волноводах в  $\text{LiNbO}_3$  представлены в [6].

Ранее детальные исследования формирования протонообменных волноводов проводились в планарной конфигурации волновода, при этом исследовались распределения концентрации протонов и распределения показателя преломления в волноводном слое [1–8]. Планарный волновод имеет в сечении одномерную структуру, которая легко описывается теоретически, что позволяет достаточно точно находить профили распределения показателя преломления. Кроме того, хорошо отработана методика экспериментального исследования профиля распределения показателя преломления планарного волновода методом призмного ввода. Однако на практике используются, в основном, канальные волноводы, имеющие в сечении двумерную структуру, рассчитать которую в большинстве случаев удается лишь численно. В настоящей работе исследования формирования протонообменных волноводов проводились для канальной конфигурации волновода.

Важнейшей характеристикой оптического излучения, распространяющегося по канальному волноводу, является профиль моды – распределение интенсивности оптического излучения в перпендикулярном направлению его распространения сечении. Именно профиль моды во многом определяет характеристики таких интегрально-оптических устройств, как ветвители и модуляторы. Так, например, оптические потери при стыковке канального од-

И.В.Ильичев, А.С.Козлов, П.В.Гаенко, А.В.Шамрай. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26; e-mail: iiv@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 18 апреля 2008 г., после доработки – 29 июля 2008 г.

номодового волновода с оптическим волокном связаны, в основном, с рассогласованием профилей мод волновода и оптического волокна.

Профиль моды канального оптического волновода определяется двумерным распределением показателя преломления в поперечном сечении волновода и поэтому во многом зависит от технологических параметров изготовления.

Целью данной работы является изучение влияния технологических параметров изготовления на профиль моды и оптические характеристики канальных одномодовых протонообменных волноводов в кристаллах ниобата лития. Конечная задача исследований заключается в разработке методики оптимизации технологических параметров изготовления таких волноводов методом низкотемпературного протонного обмена для получения заданных оптических характеристик интегрально-оптических устройств.

## 2. Результаты экспериментов

**Изготовление образцов.** Одномодовые канальные волноводы для оптического излучения в диапазоне телекоммуникационных длин волн (1530–1580 нм) были изготовлены на подложках ниобата лития  $x$ -среза методом низкотемпературного протонно-ионного обмена с последующим отжигом на воздухе. С помощью фотолитографии и вакуумного напыления на поверхности подложек были изготовлены металлические (Al, Ti) маски в виде набора из восьми прорезей с увеличивающейся от 3 до 10 мкм с шагом 1 мкм шириной. Протонно-ионный обмен проводился при температурах 180–200 °С и различных временах обмена (20 мин – 4 ч). Источником протонов служил расплав бензойной кислоты, активность протонов регулировалась добавлением бензоата лития (весовая концентрация 0–5 %). По окончании процесса металлическая маска удалялась методом «мокрого» травления, торцы волноводов полировались, и проводился последовательный отжиг полученных волноводов на воздухе в несколько этапов при температуре 350 °С, после каждого этапа отжига измерялся профиль моды образованных волноводов.

**Измерение профиля моды волноводов.** Для измерения профиля моды волновода была разработана оригинальная установка оптической зондовой микроскопии (рис. 1). Распределение интенсивности оптического излучения сканировалось вблизи торца волновода с помощью специального одномодового световода – зонда (диаметр моды зонда – 5.8 мкм), шаг сканирования – 0.4 мкм. Точность перемещения зонда (40 нм) контролировалась с помощью внешнего оптического интерферометра. Полученное рас-

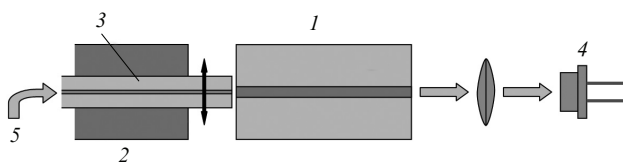


Рис. 1. Схема установки оптической зондовой микроскопии: 1 – исследуемый образец; 2 – трехкоординатная пьезоподвижка с интерферометрическим контролем перемещения; 3 – одномодовое оптическое волокно с диаметром сердцевины 6 мкм; 4 – фотодетектор; 5 – ввод оптического излучения с  $\lambda = 1550$  нм. Шаг сканирования 0.4 мкм, точность позиционирования зонда 40 нм.

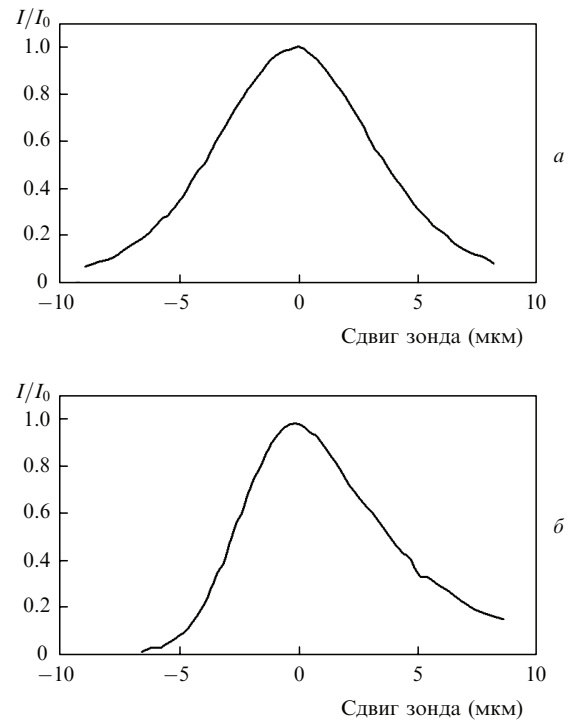


Рис. 2. Измеренное нормированное распределение интенсивности светового излучения по ширине (а) и по глубине (б) волновода; время протонно-ионного обмена 20 мин, время отжига 2 ч, ширина прорези в маске 8.2 мкм.

пределение интенсивности светового излучения по глубине и ширине волновода (рис. 2) является сверткой известной функции распределения интенсивности светового излучения моды оптического волокна и функции распределения интенсивности светового излучения моды волновода и дает представление о профиле моды в ближнем поле. Из полученного распределения вычислялась ширина  $w_m$  и глубина  $d_m$  моды волновода (по уровню интенсивности излучения  $1/e^2$ ). Для простоты расчетов предполагалось, что двумерное распределение интенсивности имеет вид произведения двух одномерных распределений по горизонтальной ( $x$ ) и вертикальной ( $y$ ) координатам. Причем результат сканирования по каждой координате представлялся как результат свертки двух функций Гаусса: профиля моды сканирующего волокна с известным коэффициентом дисперсии  $\sigma_f = 2.9$  мкм и профиля моды канального волновода с неизвестным коэффициентом дисперсии  $\sigma_{w,x(y)}$ . Для профиля моды волновода коэффициенты дисперсии по горизонтальной и вертикальной координатам могут существенно различаться. Результаты сканирования по каждой координате аппроксимировались функциями Гаусса, для которых методом наименьших квадратов находились коэффициенты дисперсии  $\sigma_{M,x(y)}$ . Ширина и глубина моды канального волновода определяются как  $w_m = 2\sigma_{w,x}$  и  $d_m = 2\sigma_{w,y}$ , где неизвестный коэффициент дисперсии находился из соотношения  $\sigma_{w,x(y)}^2 = 2\sigma_{M,x(y)}^2 - \sigma_f^2$ . Отметим, что реальный профиль моды волновода не является гауссовым, поэтому результаты вычисления ширины и глубины моды из экспериментальных результатов сканирования являются достаточно грубым приближением. Однако использование этих экспериментально определенных значений позволяет выявить основные закономерности в зависимостях профиля моды канального волновода от технологических параметров изготовления, а также прове-

сти сопоставление результатов теоретического моделирования с экспериментальными данными.

**Измерение электрооптического коэффициента волноводов.** Определение электрооптического коэффициента волновода проводилось методом измерения полуволнового напряжения при перестройке интерферометра Фабри – Перо, образованного отражением оптического излучения от торцов волновода. При отжиге более двух часов ни в одном из образцов не наблюдалось заметной деградации электрооптических характеристик – во всех волноводах эффективный электрооптический коэффициент составил 29–30 пм/В (для объемного ниобата лития  $r_{33} = 32$  пм/В).

### 3. Теоретическая модель

Было проведено численное моделирование процессов формирования волноводов, изготовленных методом низкотемпературного протонно-ионного обмена и распространения волноводных мод по этим волноводам. При этом область волноводной структуры, включающая в себя область распространения волноводной моды, была представлена в виде двухкоординатной сетки размером  $300 \times 300$  узлов с расстоянием между узлами 0.25 мкм. Для каждого узла сетки были рассчитаны значения концентрации ионов водорода, показателя преломления и амплитуды поля световой волны.

Для описания процесса формирования канального волновода методом низкотемпературного протонно-ионного обмена с последующим отжигом на воздухе нами была использована модель двухэтапной диффузии в двумерной геометрии поперечного сечения подложки. Первый этап представляет собой протонно-ионный обмен на поверхности ниобата лития, проводимый в расплаве бензойной кислоты. Второй этап – процесс высокотемпературного отжига.

На первом этапе задается область с повышенной концентрацией ионов водорода и резкой ступенчатой границей (рис.3). В нашей модели сечение данной области имеет форму трапеции. Для точек сетки, лежащих внутри трапеции, концентрация ионов водорода принимается равной 0.55, что характерно для протонно-ионного обмена [3]. Вне данной трапеции концентрация равнялась нулю. Геометрические размеры области определяются шириной прорези маски  $s$  и длиной диффузии протонов  $L$ . Последняя является функцией времени протонного обмена  $t_1$  и рассчитывается по формуле [1]

$$L = 2\sqrt{D_1 t_1}, \quad (1)$$

где  $D_1$  – коэффициент диффузии первого этапа, который используется в нашей модели в качестве подгоночного

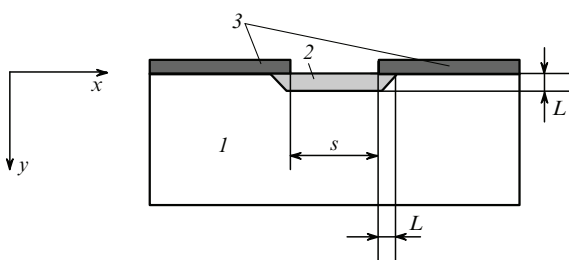


Рис.3. Модель распределения протонов в волноводе после первого этапа диффузии: 1 – подложка ниобата лития; 2 – область с повышенной концентрацией ионов водорода; 3 – металлическая маска.

параметра (предполагалось, что коэффициент диффузии не зависит от направления диффузии). Из анализа первого этапа модели было получено распределение концентрации ионов водорода по узлам сетки  $X_1(x, y)$ , задаваемое параметрами  $D_1$  и  $s$ . Оно является начальным условием для моделирования процесса высокотемпературного отжига.

На втором этапе разработанной нами упрощенной модели изменение пространственного распределения концентрации ионов водорода  $X(x, y)$  описывается уравнением диффузии с эффективным средним коэффициентом диффузии  $D_2$ , не зависящим от концентрации ионов водорода:

$$\frac{\partial X(x, y)}{\partial t} = D_2 \nabla^2 X(x, y). \quad (2)$$

С учетом того, что глубина диффузии много меньше толщины подложки, подложка может быть рассмотрена как полуплоскость. Начальное условие уравнения –  $X(x, y)|_{t=0} = X_1(x, y)$ . Граничным условием на поверхности раздела подложка – воздух является отсутствие потока ионов из подложки. Решение уравнения (2) с учетом данного условия для полуплоскости эквивалентно решению уравнения для целого пространства, образованного путем дополнения полуплоскости подложки её зеркальным отражением относительно границы с воздухом. Для численного решения уравнения (2) каждый узел сетки рассматривается как точечный источник протонов, вокруг которого в результате диффузии создаётся определенное пространственное распределение концентрации протонов. Конечным результатом численного решения уравнения (2) является концентрация ионов водорода  $X_2(x, y)$  в узлах сетки, которая есть суперпозиция пространственных распределений концентрации протонов для всех точечных источников.

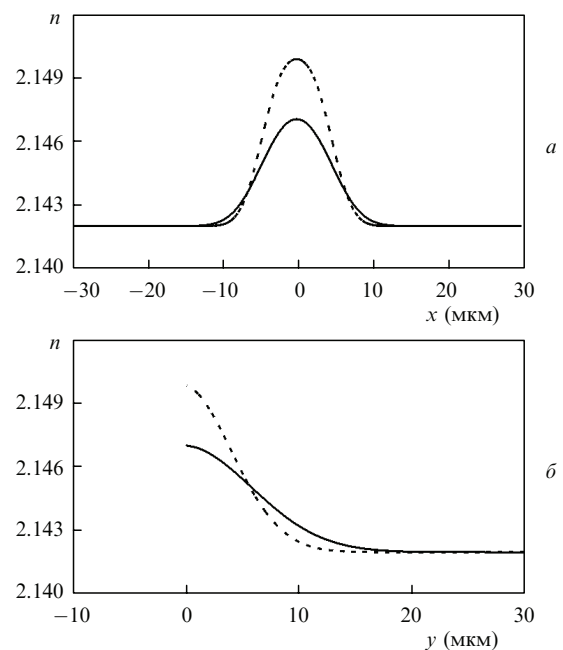


Рис.4. Теоретические распределения показателя преломления в волноводной области по ширине (а) и по глубине (б) подложки для времени постобменного отжига 2 ч (штриховая кривая) и 4 ч (сплошная кривая);  $D_1 = 0.031$  мкм<sup>2</sup>/ч,  $D_2 = 1.2$  мкм<sup>2</sup>/ч, ширина прорези в маске 8.2 мкм, время протонного обмена 20 мин.

Полученный профиль концентрации водорода пересчитывался в профиль приращения показателя преломления (рис.4) по следующим формулам [9]:

$$X \leq 0.12, \quad \Delta n = 0.1623X, \quad (3)$$

$$0.12 < X < 0.56, \quad \Delta n = 0.3636X - 0.2656x^2 - 0.0203, \quad (4)$$

$$X > 0.56, \quad \Delta n = 0.0833X + 0.0533. \quad (5)$$

Из полученного пространственного распределения показателя преломления методом конечных разностей рассчитывается распределение поля  $U_i(x, y)$  фундаментальной моды образованного оптического волновода.

Обычно для расчета волноводных мод используют приближение, в котором находят численное решение скалярных волновых уравнений для двух ортогональных поляризации поперечной электромагнитной волны. Данный метод применяется для анализа слабо направляющих волноводов, для которых разность показателей преломления волноводного канала и оболочки мала и можно пренебречь производной показателя преломления по координате. В анализируемой структуре существует резкая граница между подложкой и воздухом, на ней происходит скачкообразное изменение показателя преломления, и поэтому использование численных решений скалярных волновых уравнений приводит к большим ошибкам вычислений.

В данной работе для поиска собственных мод мы используем модификацию векторного метода конечных разностей. Собственная мода волновода ищется в виде распространяющейся волны

$$\hat{U}_i(x, y, z, t) = U_i(x, y) \exp[-i(\beta z - \omega t)], \quad (6)$$

где  $\hat{U}_i$  – компонента электромагнитного поля;  $\beta$  – постоянная распространения фундаментальной моды;  $\omega$  – частота осцилляции поля световой волны.

Для каждого узла сетки записываются уравнения Максвелла для четырех компонент амплитуды поля  $U_i(x, y)$  (двух ортогональных компонент электрического поля  $U_1 = E_x$  и  $U_2 = E_y$  и двух ортогональных компонент магнитного поля  $U_3 = H_x$  и  $U_4 = H_y$ ):

$$\begin{aligned} N_{\text{eff}} E_x &= -H_y \\ &- \left( \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial^2 H_x}{\partial x \partial y} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \frac{\partial H_x}{\partial y} - \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \frac{\partial H_y}{\partial x} \right) \frac{1}{k^2}, \\ N_{\text{eff}} E_y &= H_x \\ &+ \left( \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} - \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial^2 H_y}{\partial x \partial y} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \frac{\partial H_x}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \frac{\partial H_y}{\partial x} \right) \frac{1}{k^2}, \quad (7) \\ N_{\text{eff}} H_x &= \varepsilon E_y + \left( \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 E_x}{\partial x \partial y} \right) \frac{1}{k^2}, \\ N_{\text{eff}} H_y &= -\varepsilon E_x - \left( \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial x \partial y} \right) \frac{1}{k^2}, \end{aligned}$$

где  $N_{\text{eff}} = \beta/k$  – эффективный показатель преломления моды;  $\varepsilon$  – локальная диэлектрическая проницаемость, зависящая от пространственной координаты узла сетки;

$k = \omega/c$  – волновое число. Продольные компоненты электромагнитного поля  $E_z$  и  $H_z$  в системе уравнений (7) выражаются через поперечные составляющие. Запись системы уравнений Максвелла для четырех поперечных компонент электромагнитного поля позволяет свести поиск решения системы (7) к задаче нахождения собственных чисел и собственных векторов линейной системы уравнений. При численном решении производные компонент амплитуды поля по координатам заменяются разностью значений этих компонент в соседних узлах сетки. Получается система линейных уравнений для вектора  $U$ , компонентами которого являются амплитуды компонент электромагнитного поля для всех узлов сетки. Размерность вектора равна  $4N_g$ , где  $N_g$  – количество узлов сетки. Для сетки  $300 \times 300$  узлов получаем вектор, содержащий 360000 элементов. Данная система преобразуется к виду

$$\hat{A}U = \lambda U, \quad (8)$$

где линейный оператор  $\hat{A}$  имеет вид ленточной матрицы;

$$\lambda = (n_{\text{wg}} - N_{\text{eff}})/n_{\text{wg}} \quad (9)$$

– её собственные числа;  $n_{\text{wg}}$  – максимальное значение показателя преломления по всем узлам сетки. Система линейных уравнений (8) приведена к такому виду, что в матрице  $\hat{A}$  элементы с наибольшим по модулю значением расположены на главной диагонали, а собственные числа системы находятся в окрестности нуля. Таким образом, фундаментальной моде волновода соответствует вектор с собственным числом, наиболее близким к нулю. Для поиска такого вектора используется метод обратных итераций [10]. Согласно ему вычисляется вектор  $U_N = -\hat{A}^{-N}U_0$ , где начальное приближение  $U_0$  – случайный вектор, а  $N$  – число итераций метода. Каждая процедура вычисления  $U_N = \hat{A}^{-1}U_{N-1}$  выполняется итерационным методом Якоби с помощью  $M$  итераций, где начальным приближением для метода Якоби является вектор  $\lambda_{N-1}^{-1}U_{N-1}$ . Таким образом, весь процесс вычисления собственного вектора состоит из  $MN$  итераций, число которых составило  $\sim 10000$ . На каждом шаге процесса обратных итераций вычислялось собственное число  $\lambda_N = U_N U_{N-1} / U_N^2$ . При числе обратных итераций более 10000 точность определения собственных чисел составляла  $\sim 10^{-4}$ .

Полученный собственный вектор представляет собой набор значений амплитуд компонент электрического и магнитного полей фундаментальной моды в узлах сетки, что позволяет рассчитать интенсивность световой волны.

Таким образом, в результате численного моделирования мы находим пространственное распределение интенсивности собственной моды в поперечном сечении волновода (рис.5). Вид рассчитанного распределения зависит от параметров протонного обмена – коэффициентов диффузии  $D_1$ ,  $D_2$  и ширины прорези маски  $s$ . Из полученного распределения определяются ширина и глубина моды по уровню интенсивности  $1/e^2$ , которые сопоставляются с экспериментальными данными. При сопоставлении результатов численного моделирования с экспериментом коэффициенты  $D_1$  и  $D_2$  используются в качестве подгоночных параметров.

Разработанная теоретическая модель позволяет описать влияние технологических параметров, таких как время протонного обмена, время отжига и ширина прорези

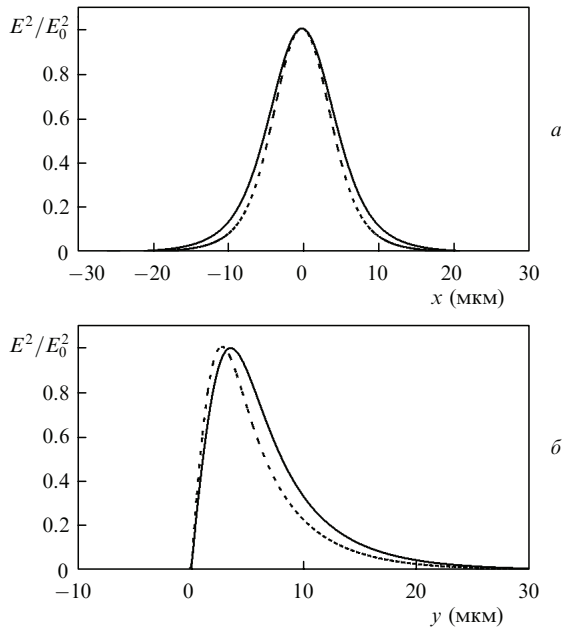


Рис.5. Теоретические пространственные распределения интенсивности собственной моды в поперечном сечении волновода по ширине (а) и по глубине (б) подложки для времени постобменного отжига 2 ч (штриховая кривая) и 4 ч (сплошная кривая); остальные параметры те же, что и на рис.4.

в маске, на глубину и ширину распределения интенсивности в поперечном сечении фундаментальной моды. Найденные коэффициенты  $D_1$  и  $D_2$  могут быть использованы для корректировки технологических параметров изготовления волноводов с целью получения заданного профиля моды.

#### 4. Обсуждение результатов

Изначально технологические параметры были выбраны из анализа литературных данных для получения волноводов, согласованных со стандартным одномодовым волокном типа SMF-28. На рис.6 представлена зависимость ширины и глубины моды волновода от ширины прорези в маске при различном времени высокотемпературного отжига (время протонно-ионного обмена 20 мин). Видно, что при  $s < 5$  мкм после 2 ч отжига волноводы не поддерживают распространение фундаментальной моды  $\lambda = 1550$  нм – наблюдается так называемое явление отсечки, характерное для волноводов с несимметричными граничными условиями. При увеличении  $s$  до 7 мкм ширина моды уменьшается от 15 до 10.5 мкм, эта область соответствует слабоведущим оптическим волноводам, близким к отсечке. При дальнейшем росте  $s$  ширина моды волновода практически не изменяется. Глубина моды волновода имеет аналогичную зависимость от ширины прорези в маске.

Дополнительные два часа отжига (суммарное время отжига 4 ч) приводят к увеличению размеров волноводной моды (по сравнению с отжигом 2 ч) при той же ширине прорези в маске, что связано с диффузионным размыванием области с повышенной концентрацией водорода. Отметим, что внутри области сильной зависимости размеров волноводной моды от  $s$  (область слабоведущих оптических волноводов, близких к отсечке) существует такая ширина прорези маски, при которой ширина волноводной моды будет совпадать с ее глубиной. Так,

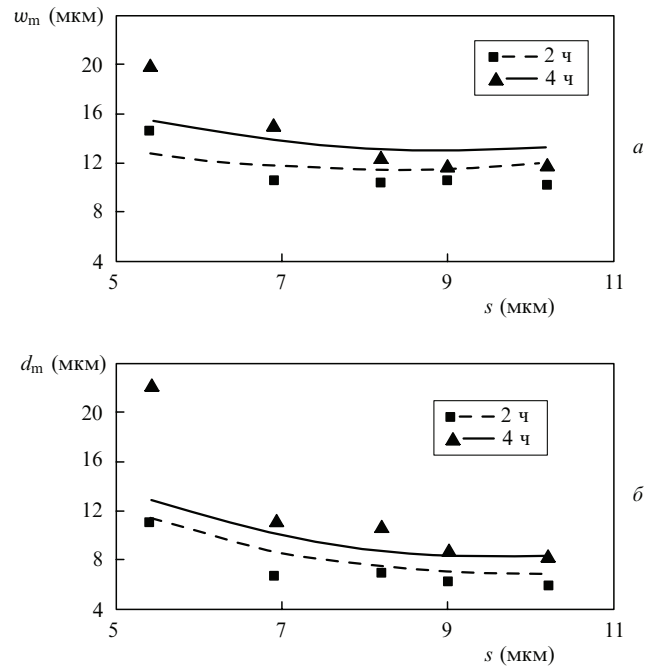


Рис.6. Экспериментальные (точки) и теоретические (кривые) зависимости ширины (а) и глубины (б) моды волновода от ширины прорези в маске для различного времени постобменного отжига;  $D_1 = 0.031$  мкм/ч,  $D_2 = 1.2$  мкм/ч, время протонного обмена 20 мин.

эксперимент показывает, что при суммарном времени отжига 4 ч и при  $s = 6$  мкм ширина и глубина волноводной моды будут равны 17 мкм.

В разработанной теоретической модели значения коэффициентов диффузии  $D_1$  и  $D_2$  использовались в качестве подгоночных параметров. Таким образом были получены теоретические кривые зависимости ширины и глубины распределения интенсивности в волноводной моде от ширины прорези в маске при значениях технологических параметров, соответствующих экспериментальным кривым. Ключевым моментом в определении подгоночных параметров является согласование условий отсечки при экспериментально определенных ширинах прорези в маске. Хорошее согласие теоретических кривых с экспериментальными данными и согласование условий отсечки наблюдается при  $D_1 = 0.031$  мкм/ч и  $D_2 = 1.2$  мкм/ч (см. рис.6).

Указанные значения параметров  $D_1$  и  $D_2$ , полученные для образцов со временем протонного обмена 20 мин, были использованы для расчета зависимостей ширины и глубины волноводной моды от ширины прорези в маске при увеличении времени протонного обмена до 50 мин и времени постобменного отжига 4 ч (рис.7). В соответствии с теоретической моделью качественно понятно, что при увеличении времени протонного обмена должно увеличиться общее число протонов, вошедших в подложку. При фиксированных остальных технологических параметрах это в конечном итоге приводит к увеличению показателя преломления волноводного канала и, следовательно, к более сильной локализации поля световой волны и к уменьшению эффективной ширины и глубины волноводной моды.

Из рис.7 видно, что имеет место удовлетворительное согласие теоретических кривых с экспериментальными данными. Как и предсказывает теория, увеличение времени протонного обмена с 20 до 50 мин при прочих равных условиях приводит к значительному уменьшению

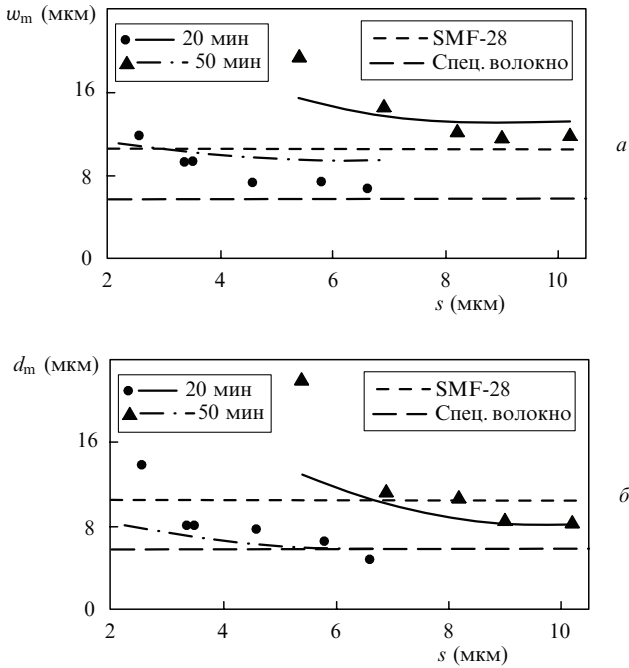


Рис. 7. Экспериментальные (точки) и теоретические (кривые) зависимости ширины (а) и глубины (б) моды волновода от ширины прорези в маске для различного времени протонного обмена;  $D_1 = 0.031$  мкм/ч,  $D_2 = 1.2$  мкм/ч, время постобменного отжига 4 ч. Две горизонтальные линии, соответствующие диаметру моды стандартного телекоммуникационного волокна SMF-28 и специального волокна, иллюстрируют степень согласования мод.

размеров моды волновода. Кроме того, при увеличении времени протонного обмена отсечка не наблюдается даже при  $s = 2.5$  мкм (ширина моды волновода равна 12 мкм, а глубина – 14 мкм). Слабая зависимость размеров моды от ширины прорези в маске наступает при  $s > 4$  мкм. Если же  $s > 7$  мкм, то волновод начинает поддерживать распространение двух и более мод при  $\lambda = 1550$  нм, что соответствует и теоретическому расчету.

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования влияния технологических параметров на размер моды канального волновода, изготовленного методом низкотемпературного протонного обмена с последующим отжигом, показали, что ширина маски является дополнительным параметром, который позволяет значительно влиять на характеристики волновода, в частности на параметры волноводной моды. При одних и тех же условиях изготовления поперечные размеры волноводной моды могут изменяться от 20 до 5 мкм только в результате изменения размеров маски. Важным выводом из настоящей работы является и то, что размер маски оказывает влияние и на ширину, и на глубину моды. Анализ полученных экспериментальных данных с использованием разработанной упрощенной теоретической модели показывает, что для технологических параметров, типичных для изготовления одномодовых волноводов без деградации электрооптических свойств, именно общее количество вошедших в подложку ниобата лития на стадии протонно-ионного обмена (первый этап) ионов водорода определяет максимальное изменение показателя преломления в волноводном канале. При этом количество водорода определяется как временем и температурой протонно-ионного обмена, так и размерами прорези в маске (чем шире прорезь, тем больше площадь

протонно-ионного обмена и больше водорода заходит в подложку).

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что в области сильной зависимости размеров волноводной моды от ширины прорези в маске (область слабеведущих оптических волноводов, близких к отсечке) можно подобрать такую ширину прорези, при которой получится волновод с практически идеально симметричной модой. Однако даже небольшое отклонение от заданных технологических параметров будет приводить к большой ошибке в размерах волноводной моды.

В ходе исследований было выявлено, что возможно определить такие технологические параметры изготовления волноводов, при которых характеристики волноводной моды слабо зависят от изменения ширины прорези маски в диапазоне  $\pm(1 \div 1.5)$  мкм. Наличие такой области важно для практических применений, поскольку это обеспечивает слабую зависимость характеристик интегрально-оптических устройств от ошибок изготовления на стадии фотолитографии, что особенно существенно при массовом производстве.

Установлено, что для хорошего согласования канального волновода со стандартным телекоммуникационным волокном SMF-28 должна использоваться маска с шириной прорези  $s = 8 - 10$  мкм, время протонного обмена должно составлять 20 мин при температуре  $200^\circ\text{C}$ , а время постобменного отжига – 4 ч при температуре  $350^\circ\text{C}$ . Измеренные ширина и глубина моды таких волноводов составляют  $w_m = 11.8 - 12.4$  мкм и  $d_m = 8.2 - 10.8$  мкм. Если считать гауссовым распределение интенсивности волноводной моды с  $w_m = 12$  мкм и  $d_m = 9$  мкм, то по оценке потери на согласование с волокном SMF-28 составят 0.21 дБ для одного соединения волокно – волновод. Данная оценка является весьма грубой, поскольку реальное распределение интенсивности в волноводной моде (особенно по вертикальной координате) существенно отличается от гауссова. Измеренные сквозные оптические потери из волокна в волновод при стыковке образца с обоих торцов составили 2.5 дБ. Заметим, что данные потери включают в себя, помимо потерь на согласование, френелевские потери на отражение от торцов и собственные внутренние потери волноводного канала. Для согласования волновода со специальным волокном (с диаметром моды 5.8 мкм) использовался волновод, изготовленный при следующих условиях: время протонного обмена 50 мин при  $200^\circ\text{C}$ , время постобменного отжига 4 ч при  $350^\circ\text{C}$ ,  $s = 4.5 - 6.5$  мкм. Размеры моды таких волноводов  $w_m = 6.8 - 7.4$  мкм и  $d_m = 4.6 - 7.6$  мкм, а теоретическая оценка потерь на согласование при  $w_m = 6.8$  мкм и  $d_m = 4.6$  мкм составляет 0.25 дБ.

## 5. Заключение

Проведены экспериментальные и теоретические исследования влияния технологических параметров низкотемпературного протонно-ионного обмена на профиль волноводной моды канальных волноводов в ниобате лития. Условия изготовления канальных волноводов были подобраны так, что оптические волноводы обладали хорошими электрооптическими характеристиками, близкими к характеристикам объемного кристалла. Было изучено влияние ширины прорези в маске на профиль волноводной моды. Показано, что при изготовлении волноводов методом протонно-ионного обмена ширина про-

рези может служить дополнительным параметром для изготовления волноводов с наперед заданным профилем моды, причем ширина прорези влияет как на ширину, так и на глубину волноводной моды. В то же время продемонстрировано, что при изготовлении волноводов методом низкотемпературного протонного обмена с последующим отжигом можно подобрать такие технологические параметры и ширину прорези в маске, при которых размер волноводной моды практически не зависит от погрешности ширины маски в диапазоне  $\pm(1 \div 1.5)$  мкм. Данные условия обеспечивают высокую устойчивость к погрешностям изготовления, особенно на стадии фотолитографии. Была разработана упрощенная теоретическая модель, которая помогает корректировать технологические параметры изготовления волноводов, с целью получения заданных профиля моды и технических характеристик интегрально-оптических устройств. Результаты теоретического анализа согласуются с полученными экспериментальными данными.

Авторы выражают благодарность М.П.Петрову за неоценимую помощь в работе над данной публикацией.

1. Jackel J.L., Rice C.E., Veselka J.J. *Appl. Phys. Lett.*, **41**, 607 (1982).
2. Korkishko Y.N., Fedorov V.A. *In ion exchange in single crystal for integrated optics and optoelectronics* (Cambridge: Cambridge International Sci. Publ, 1999) p. 97.
3. Коркишко Ю.Н., Федоров В.А. *ЖТФ*, **69** (3), 47 (1999).
4. Bortz M.L., Eyres L.A., Fejer M.M. *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 2012 (1993).
5. Suchoski P.G., Findakly T.K., Leonberger F.J. *Opt. Lett.*, **13**, 1050 (1988).
6. Коркишко Ю.Н., Федоров В.А. *Кристаллография*, **44** (3), 271 (1999).
7. Mendez A., de la Paliza G., Garcia-Cabanes A., Cabrera J.M. *Appl. Phys. B.*, **73**, 485 (2001).
8. Espeso O., Garcia G., Climent A., Agullo-Lopez F., de la Paliza G., Cabrera J.M., Sajavaara T. *J. Appl. Phys.*, **94**, 7710 (2003).
9. Torben Veng, Torben Skettrup. *J. Lightwave Techn.*, **16**, 646 (1998).
10. Фаддеев Д.К., Фаддеева В.Н. *Вычислительные методы линейной алгебры* (М.: Лань, 2002).