

09

Выделение поляризации в титан-диффузных волноводах на подложках ниобата лития

© П.М. Караваев¹, И.В. Ильичев¹, П.М. Агрузов¹, А.В. Тронев^{1,2},
А.В. Шамрай^{1,2,3}

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

² Университет информационных технологий, механики и оптики,
Санкт-Петербург

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
E-mail: pmk.shuv@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 6 января 2016 г.

Проведен теоретический анализ влияния технологических параметров термической диффузии титана на поляризационно-зависимые потери оптических волноводов на подложках ниобата лития. Показано, что анизотропия изменения показателя преломления приводит к разным условиям отсечки собственных поляризационных мод и может использоваться для выделения необыкновенной и гашения обыкновенной поляризации. На титан-диффузных волноводах экспериментально продемонстрирован коэффициент выделения необыкновенной поляризации более 40 dB в C-диапазоне телекоммуникационных длин волн (1530–1565 nm).

Ниобат лития (LiNbO_3) является одним из основных материалов для изготовления устройств интегральной оптики. Ряд устройств интегральной оптики, например модуляторы, датчики, гироскопы, требуют высокой степени выделения заданной поляризации. Основным способом создания волноводных поляризаторов в кристаллах ниобата лития является протонный обмен [1]. При изготовлении волноводов методом протонного обмена изменение показателя преломления для обыкновенной поляризации отрицательное, а для необыкновенной поляризации — положительное, а сформированный волновод поддерживает распространение одной поляризационной моды с линейной необыкновенной поляризацией [2]. К недостаткам протонно-обменных волноводных поляризаторов относятся высокие потери ($> 0.5 \text{ dB/cm}$) и ухудшение электрооптических параметров. Кроме этого в протонно-

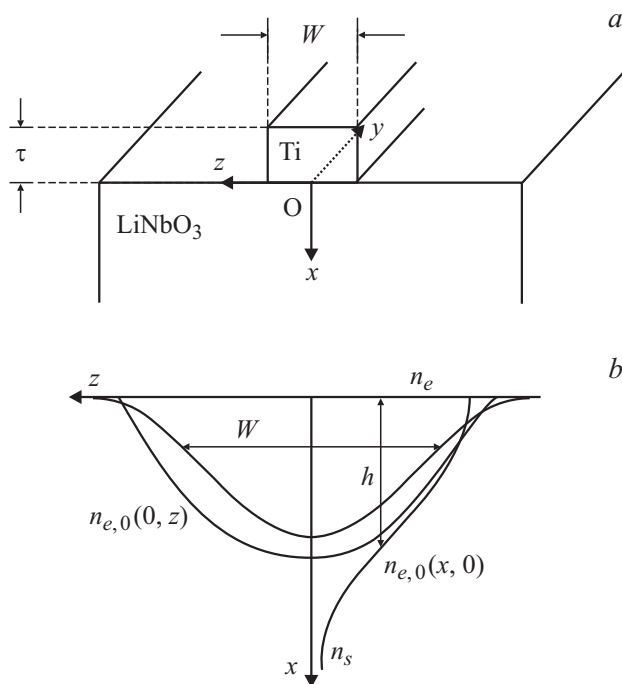


Рис. 1. Геометрия титановой полоски (а) и распределение показателя преломления в титан-диффузном волноводе (b).

обменных волноводах происходит сильное ухудшение волноводных свойств при температурах выше 200°C , что приводит к ограничениям на последующие технологические операции при изготовлении интегрально-оптической схемы и условия их эксплуатации.

Другим методом изготовления волноводов в LiNbO_3 является термодиффузия ионов титана [3]. Титан-диффузные волноводы сохраняют свои свойства в широком диапазоне температур и обладают низкими потерями ($\sim 0.1 \text{ dB/cm}$). При этом в таких волноводах изменение показателя преломления для обыкновенной и необыкновенной поляризации положительное, волноводы не обладают свойством выделения поляризации и поддерживают распространение обеих ортогональных поляризационных мод. Использование изготовленного на поверхности

волновода плазмон-поляритонного поляризатора [4] для выделения ТЕ-моды неизбежно приводит к дополнительным потерям в волноводе.

В данной статье исследуется оригинальный метод выделения поляризации в титан-диффузных волноводах, основанный на анизотропии условий отсечки фундаментальной моды.

Ввиду сильной асимметрии волноводов на подложках LiNbO_3 (большое различие в граничных условиях волноводный слой — воздух и волноводный слой — подложка) в них наблюдается отсечка фундаментальной моды. Нормированная частота отсечки определяется из выражения [5]

$$V_0 = \arctan \sqrt{a}, \tag{1}$$

где $a = (n_s^2 - n_c^2)/(n_{eff}^2 - n_s^2)$ — параметр асимметрии, n_s — показатель преломления подложки, n_c — показатель преломления верхнего покрывающего слоя, n_{eff} — эффективный показатель преломления волноводного слоя. При этом кристаллы LiNbO_3 обладают сильной анизотропией, что может приводить к анизотропии отсечки фундаментальной моды.

После полной диффузии полоски титана шириной W и высотой τ внутрь кристаллической подложки LiNbO_3 X-среза (рис. 1) пространственное распределение концентрации титана описывается как [6]:

$$\begin{aligned} C(x, z) &= C_0 f(x) g(z), \\ f(x) &= \exp\left(-\frac{x^2}{4D_x t}\right), \\ g(z) &= \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{W}{4\sqrt{D_z t}}\left(1 + \frac{2z}{W}\right)\right] + \operatorname{erf}\left[\frac{W}{4\sqrt{D_z t}}\left(1 - \frac{2z}{W}\right)\right] \right\}, \\ C_0 &= \frac{\rho N_A}{M_{at}} \frac{\tau}{\sqrt{\pi D_x t}}. \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь erf — функция ошибок, t — время диффузии, D_x и D_z — коэффициенты диффузии вдоль горизонтальной и вертикальной осей при заданной температуре диффузии, постоянная C_0 включает в себя плотность ($\rho = 4.51 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) и молярный вес ($M_{at} = 47.9 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$) титана, а также число Авогадро (N_A). Зависимость локального изменения показателя преломления для обыкновенной и необыкновенной поляризации от концентрации титана описывается эмпирической формулой [6]

$$\Delta n_{e,o}(x, z) = \left[\frac{C(x, z)}{C_{e,o}} \right]^{\eta_{e,o}}. \tag{3}$$

Индексы „e“ и „o“ обозначают необыкновенную и обыкновенную поляризации, константы $D_{x,z}$, $C_{e,o}$ и $\eta_{e,o}$ сильно зависят от технологических условий процесса термодиффузии, таких как влажность, чистота титана, кристаллические параметры используемой подложки. Приближенное выражение для длины волны отсечки получаем из (1) подстановкой (3) и (2), учитывая малость изменения показателя преломления в волноводном канале $\Delta n_{e,o}/n_{e,o} \sim 10^{-3}$:

$$\lambda_0^{e,o} \approx 4 \cdot 2\sqrt{D_x t} \sqrt{2n_{e,o}\Delta n_{e,o}(0,0)}. \quad (4)$$

Таким образом, длина волны отсечки в титан-диффузном волноводе пропорциональна глубине волноводного слоя (глубине диффузии — $2\sqrt{D_x t}$) и корню квадратному из вызванного диффузией титана изменения показателя преломления. Глубина диффузии определяется температурой и временем процесса и не зависит от состояния поляризации света. Изменение показателя преломления больше для необыкновенной поляризации, особенно при высокой концентрации титана [6], поэтому длина волны отсечки для данной поляризации также будет больше. Таким образом, задав длину волны распространяющегося по волноводу света, можно подобрать технологические условия так, что концентрация титана в волноводе будет обеспечивать длину волны отсечки для необыкновенной поляризации больше, а для обыкновенной поляризации меньше заданной длины волны света. Изготавливаемый при данных условиях титан-диффузный волновод будет поддерживать распространение только одной, необыкновенной линейно поляризованной моды.

На рис. 2 представлены зависимости, показывающие область технологических параметров, обеспечивающих выделение необыкновенной поляризации. По оси абсцисс откладывается ширина полоски титана W , определяющая при заданной высоте полоски τ общее количество Ti, продиффундировавшего внутрь подложки. По оси ординат отложены время диффузии t и глубина оптического волновода h . Область выделения поляризации ограничена кривыми, рассчитанными из (4) для двух собственных поляризационных мод — пространство над кривой (a), соответствующей длине волны отсечки 1565 nm для необыкновенной поляризации, и под кривой (b), соответствующей длине волны отсечки 1530 nm для обыкновенной поляризации, что гарантирует выделение поляризации во всем C-диапазоне телекоммуникационных длин волн. Расчеты проводились при фиксированной температуре диффузии $T = 1050^\circ\text{C}$, обеспечивающей формирование

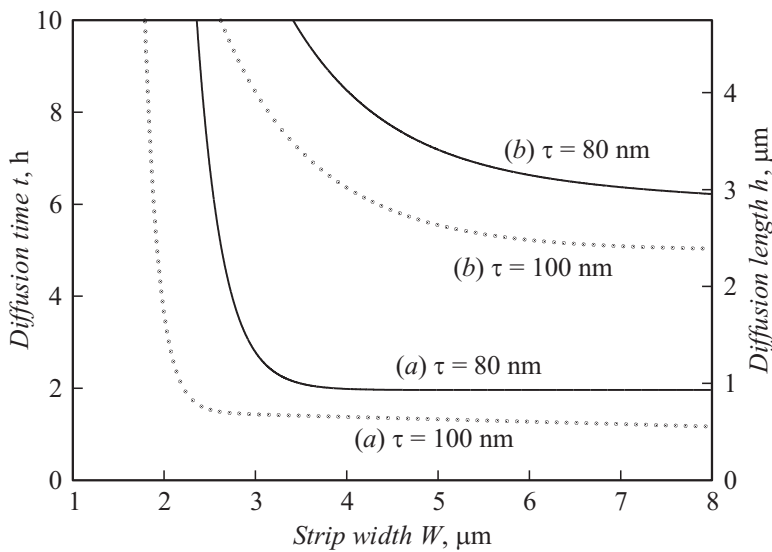


Рис. 2. Диаграмма границы области выделения поляризации. Кривые отсечки фундаментальной моды на длине волны 1530 nm для обыкновенной поляризации (a) и на длине волны 1565 nm для необыкновенной поляризации (b) ограничивают области выделения поляризации для двух значений высоты полоски титана $\tau = 80$ nm (сплошная линия) и $\tau = 100$ nm (штриховая линия).

оптических волноводов высокого качества с низкими оптическими потерями, для двух значений высоты полоски $\tau = 80$ и 100 nm. Параметры $D_x = D_z = 6 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $C_e = 7 \cdot 10^{29} \text{ m}^{-3}$, $C_o = 2.5 \cdot 10^{31} \text{ m}^{-3}$ и $\eta_e = 0.9$, $\eta_o = 0.6$ были выбраны на основании анализа литературных данных [6].

Для проверки полученных теоретических результатов были изготовлены образцы канальных оптических волноводов длиной 17 mm. На подложках ниобата лития X-среза формировались полоски титана различной ширины от 3 до 7 μm и толщиной 80 и 100 nm. Термодиффузия титана проводилась при температуре 1050°C в течение 5, 6 и 7 h. Результаты измерения поляризационно-зависимых потерь (PDL), коэффициента выделения необыкновенной поляризации представлены на рис. 3. Для образцов, изготовленных при технологических параметрах,

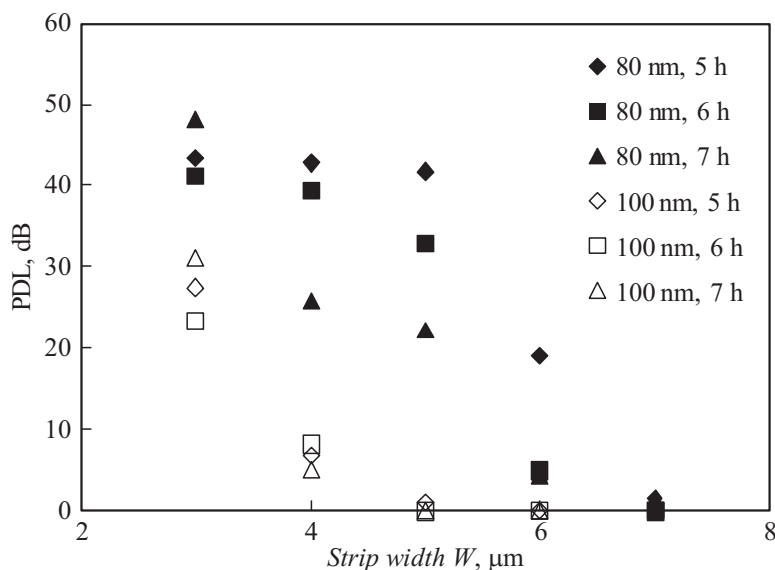


Рис. 3. Коэффициент поляризационной экстинкции (PDL) экспериментальных образцов в зависимости от ширины полоски титана (Strip width, W) при разных параметрах диффузии.

соответствующих области выделения поляризации на диаграмме рис. 2, экспериментально измеренный коэффициент выделения поляризации превышает 40 dB.

Таким образом, продемонстрирована возможность формирования методом термической диффузии титана на подложках ниобата лития оптических волноводов с высоким коэффициентом выделения необыкновенной линейной поляризации (более 40 dB). Волноводы, изготовленные по титан-диффузной технологии, существенно более устойчивы к внешним условиям (особенно к высоким температурам) по сравнению с обычно используемыми в качестве поляризаторов протонно-обменными волноводами. Это расширяет спектр технологических операций, которые можно применять к сформированным оптическим волноводам без деградации их характеристик.

Механизм выделения основан на анизотропии изменения показателя преломления, приводящей к анизотропии условий отсечки для фунда-

ментальной моды с разной поляризацией. Хотя выделение поляризации в титан-диффузных волноводах наблюдалось ранее [7], в данной работе впервые дано теоретическое описание этого эффекта, выявлена связь с технологическими параметрами диффузии и определена область значений технологических параметров, обеспечивающих высокий коэффициент выделения поляризации (более 40 dB). Отметим, что ширина полоски титана может быть использована как параметр, регулирующий коэффициент выделения поляризации. На сложных интегрально-оптических схемах участки с выделением поляризации могут быть созданы просто выбором ширины фотолитографической маски.

Результаты работы весьма интересны для создания интегрально-оптических схем с высоким коэффициентом поляризационной экстинкции, таких как фазовый модулятор в составе волоконно-оптического гироскопа.

Работа была профинансирована из средств проекта ФЦП „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы“, соглашение № 14.604.21.0055 (RFMEFI60414X0055).

Список литературы

- [1] *Rajneesh K., Pal S., Das B.K.* // ICOP-2009, paper-D1, 2009.
- [2] *Korkishko Yu.N., Fedorov V.A.* // Ion exchange in single crystals for integrated optics and opt electronics Cambridge International Science Publ. Cambridge, 1999. P. 106–148.
- [3] *James E. Toney.* Lithium Niobate Photonics. Norwood, MA. Artech House, 2015. P. 288.
- [4] *Ильичев И.В., Тогузов Н.В., Шамрай А.В.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 17. С. 97–103.
- [5] Интегральная оптика / Под ред. Т. Тамира. М.: Мир, 1978. С. 344.
- [6] *Ganguly P., Biswas J.C., Lahiri S.K.* // J. Opt. 2010. V. 39 (4). P. 175–180.
- [7] *Dobrusin V., Ruschin S.* // Opt. Engin. December 2008. V. 47 (12). P. 120 504(1–3).