

УДК 621.373.8

ПОЛОСКОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДЫ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК Si_3N_4 С РЕШЕТОЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ВВОДА-ВЫВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ

К.О.Воропаев, Б.И.Селезнев, А.С.Ионов*, А.В.Петров*

STRIP OPTICAL WAVEGUIDES BASED ON THIN FILMS OF Si_3N_4 WITH LATTICE ELEMENTS OF THE INPUT-OUTPUT RADIATION

K.O.Voropaev, B.I.Seleznev, A.S.Ionov*, A.V.Petrov*

Институт электронных и информационных систем НовГУ, Kirill.Voropaev@novsu.ru

*ОАО «ОКБ-Планета», Великий Новгород

Рассмотрены тонкопленочные полосковые оптические волноводы и решеточные элементы связи, применяемые для осуществления ввода и вывода излучения. Разработаны топология и технология получения волноводов на основе тонких пленок Si_3N_4 . Изготовленные образцы полосковых волноводов исследованы методами сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии. Проведены оценки профиля и морфологии изготовленных волноводов.

Ключевые слова: интегральная фотоника, полосковые волноводы, решеточный элемент связи, полное внутреннее отражение, нитрид кремния

This paper considers thin-film strip optical waveguides and the lattice coupling elements used to implement the input and output of radiation. The authors developed topology and technology for producing waveguides based on Si_3N_4 thin films. Manufactured samples of the strip waveguides were examined by scanning and atomic force microscopy. Assessment of profile and morphology of the fabricated waveguides is carried out.

Keywords: integrated photonics, strip waveguides, lattice coupling elements, total internal reflection, silicon nitride

Введение

Волноводная фотоника рассматривает различные явления, связанные с распространением света и его преобразованием в волноводных структурах на основе тонких (сравнимых с длиной волны λ) диэлектрических и полупроводниковых слоев. Волноводная фотоника включает создание интегральных оптических схем, подобно интегральным микросхемам, на единой подложке, используя методы планарной технологии микроэлектроники [1].

Одним из важнейших элементов интегральной фотоники являются оптические волноводы. Таких элементов существует несколько типов, в данной работе будут рассматриваться полосковые оптические волноводы.

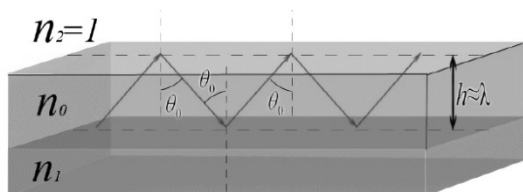


Рис.1. Распространение света в полосковом волноводе

В полосковых оптических волноводах распространение света в тонких слоях происходит на основе эффекта полного внутреннего отражения (рис.1). Оптический волновод представляет собой диэлектриче-

скую пленку толщиной h с коэффициентом преломления n_0 , нанесенную на подложку с показателем преломления $n_1 < n_0$. Световой луч, падая на границу раздела плёнка-подложка под углом $\theta_0 > \theta_c$, где θ_c — критический угол, испытывает полное внутреннее отражение от этой границы и от границы плёнки с верхней средой, которая может быть, например, воздухом.

В работе [2] представлена разработка технологии получения планарных градиентных волноводов на основе нанослоев фторированного кварцевого стекла в плазме СВЧ-разряда пониженного давления. Применение пористого кремния для создания оптических структур рассмотрено в работе [3]. В пористом кремнии формировался монолитный оптический канал, обладающий волноводными свойствами. Известен способ изготовления интегральных оптических элементов на основе полосковых оптических волноводов, сформированных в слое Si_3N_4 [4,5]. Отмечается, что данные структуры обладают ультранизкими оптическими потерями. Представляется перспективным проведение дальнейших исследований по формированию оптических волноводов на основе пленок нитрида кремния.

В данной работе была разработана и опробована технология получения ранее смоделированного прямоугольного полоскового волновода с решеточными элементами ввода-вывода излучения, имеющими прямоугольную симметричную структуру.

Реализация ввода-вывода излучения в планарных волноводах через решеточный элемент связи

Решеточные элементы используются для обеспечения фазового согласования между определенной волноводной модой и оптическим пучком, падающим наклонно к поверхности волновода. Вследствие своей периодической структуры данный элемент связи возмущает волноводные моды в области, находящейся под решеткой, вызывая тем самым разложение каждой моды в ряд пространственных гармоник с постоянными распространения в направлении оси z (рис.2).

Решеточный элемент связи был изобретен в 1970-х гг. как метод связи свободно распространяющегося лазерного излучения и тонких стеклянных пленок [6]. Данный элемент связи по существу является брэгговской решеткой, оптимизированной для дифракции света от источника в волновод. Его действие определяется условием Брэгга, которое имеет следующий вид [7]:

$$n_{eff} = n_{top} \sin(\theta_c) + m \frac{\lambda}{\Lambda},$$

где n_{eff} — показатель преломления материала решетки; n_{top} — показатель преломления материала, покрывающего решетку; θ_c — угол падения излучения на решетку (измеряется перпендикулярно плоскости решетки); m — дифракционная мода; λ — длина волны падающего излучения; Λ — период решетки.

Различают прямоугольную, трапециевидную или треугольную форму зубцов решетки. В данной работе рассматривается прямоугольный тип решетки.

В работе [6] исследованы различные методы осаждения пленок Si_3N_4 для изготовления полосковых волноводов, для ввода излучения использовался решеточный элемент ввода. Отличием настоящей статьи является режим формирования SiO_2 . Нижний слой оксида кремния формируется методом термического окисления кремния, за счет чего получаемый слой SiO_2 имеет меньшую шероховатость поверхности по сравнению с процессом осаждения из плазмы (PECVD). Кроме того, использование данного метода обеспечивает более высокую чистоту и равномерность пленки. В данной работе рассматривается технология травления волноводной структуры и проводится качественная оценка профиля и морфологии получаемого рельефа. Схематично вид полученной структуры показан на рис.2.

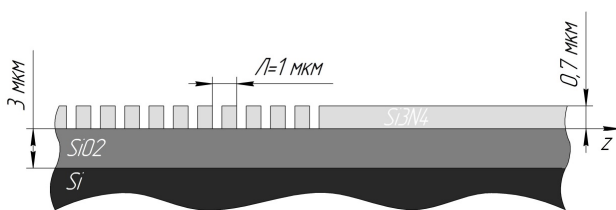


Рис.2. Вид полученного оптического волновода с решеточным элементом связи в разрезе

Технология формирования оптических полосковых волноводов

Исходным материалом для формирования волноводных структур в настоящей работе являлась кремниевая подложка марки КЭФ-4,5. На первом этапе осуществлялось выращивание на исходной подложке диэлектрических пленок, формирующих в дальнейшем волноводную структуру.

Одним из условий каналирования излучения в оптическом волноводе является осуществление полного внутреннего отражения света, распространяющегося в волноводном слое [1]. Для достижения данного требования слой, являющийся сердцевинной оптического волновода, должен быть заключен между материалами, показатель преломления которых ниже, чем показатель преломления данного слоя. Так как показатель преломления кремния ($n_{587\text{nm}} = 3,42$) существенно выше, чем у нитрида кремния ($n_{587\text{nm}} = 2,02$), то на начальном этапе было необходимо сформировать слой материала с показателем преломления меньшим, чем у Si_3N_4 . Помимо того, что данный слой должен образовывать оптическое зеркало на границе раздела SiO_2 - Si_3N_4 , он должен также препятствовать поглощению излучения, падающего на решеточный элемент связи, подложкой. Для этих целей подходит естественный окисел кремния SiO_2 ($n_{587\text{nm}} = 1,46$).

Первым технологическим этапом являлось выращивание на поверхности подложки буферного слоя SiO_2 . Слой оксида кремния формировался методом термического окисления кремния во влажном кислороде при температуре 1150°C . Толщина полученного слоя составила 3 мкм. По окончании процесса методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) была исследована морфология полученных пленок SiO_2 . По результатам измерений шероховатость поверхности составила 0,8 нм.

На следующем технологическом этапе формировалась пленка Si_3N_4 , являющаяся сердцевинной оптических волноводов. Данная пленка формировалась методом химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ) при пониженном давлении. В основе процесса осаждения лежит пиролитическое разложение газовой смеси моносилана (SiH_4) с аммиаком (NH_3) под воздействием температуры. Формула химической реакции, лежащей в основе данного процесса, выглядит следующим образом: $\text{SiH}_4 + \text{NH}_3 \xrightarrow{900^\circ\text{C}} \text{Si}_3\text{N}_4 + \text{H}_2$. Пониженное давление, создаваемое во время процесса, позволяет формировать слой нитрида кремния, содержащего малое количество включений водорода. Толщина осаждаемой пленки составляла 0,7 мкм. По результатам измерений, проведенных методом АСМ, шероховатость поверхности после осаждения нитрида кремния составила 3 нм.

Для формирования топологического рисунка волноводов, сопряженных по обоим концам с решеточными элементами связи, применялись процессы электронной литографии и плазмохимического травления. Топология на примере одиночного волновода представлена на рис.3.

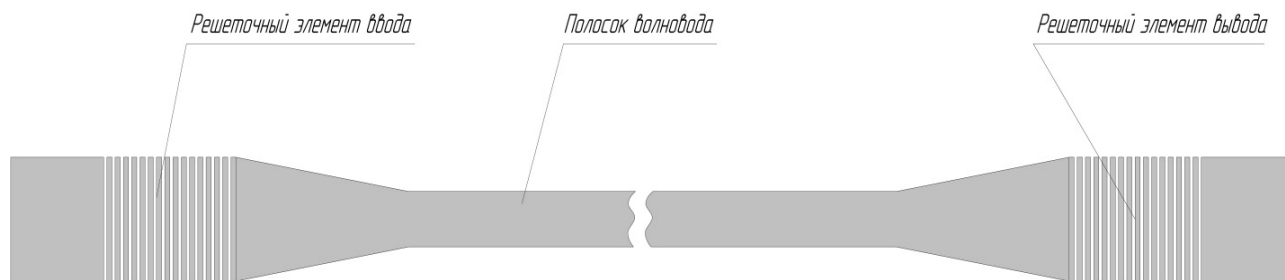


Рис.3. Вид единичного оптического планарного волновода

Так как в смоделированной топологии оптических волноводов штрихи решетчатых элементов связи обладают субмикронными размерами, невозможно использовать классическую контактную фотолитографию. Для формирования резистивной маски под травление слоя Si_3N_4 в данной работе использовалась электронно-лучевая литография, выполняемая на установке Voyager фирмы Raith. Для литографии использовался негативный электронный резист AllResist AR-N 7500.

После формирования резистивной маски для формирования «тела» планарных волноводов проводилось прецизионное травление пленки нитрида кремния. Процесс должен гарантировать высокую точность травления, качественную морфологию вытравленной поверхности, при этом необходимо обеспечение прямоугольного профиля стенок решетчатых элементов. Для осуществления данной цели был выбран метод плазмохимического травления (ПХТ) во фторсодержащей плазме, который осуществлялся на установке Sentech SI500. Установка позволяет выполнять процессы реактивно-ионного плазменного травления (РИПТ) и травления в индуктивно-связанной плазме (ИСП). Во время травления осуществлялся in-situ контроль при помощи интерферометра, что позволило выполнять травление с высокой точностью. Необходимость высокой точности травления обусловлена тем, что при травлении пленки нитрида кремния требуется остановиться на границе раздела Si_3N_4 - SiO_2 , так как углубление в слой оксида кремния приведет к повышению оптических потерь в решетке.

Формирование рельефа проводилось в две стадии. Для получения прямоугольного профиля и минимизации подтравки полосок волновода и штрихов решетки связи, осуществлялся процесс реактивно-ионного травления. Для его осуществления использовались газы CF_4 , O_2 . Расходы газов во время процесса травления составляли $\text{CF}_4 = 80 \text{ sccm}$, $\text{O}_2 = 16 \text{ sccm}$, давление в камере соответствовало 5 Па, мощность источника ВЧ смещения — 70 Вт. Остановка травления производилась по достижении слоя SiO_2 , что, в свою очередь, оценивалось по показаниям интерферометра.

В процессе исследований методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) было выявлено, что во время реактивно-ионного плазменного травления формируются гладкие вертикальные стенки волноводов, но при этом в результате активной ионной бомбардировки поверхности морфология дна вытравливаемого рельефа имеет весьма развитую шероховатость (рис.4).

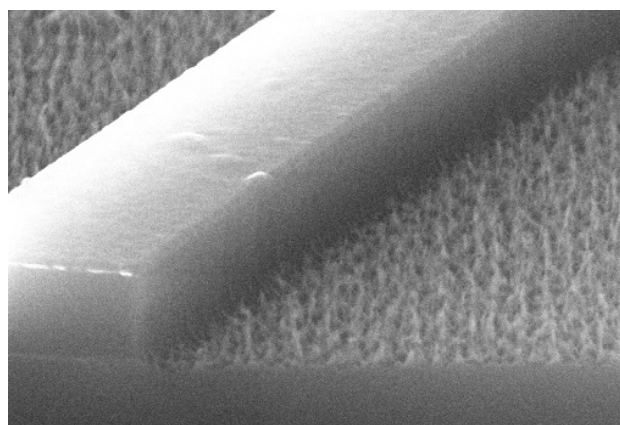


Рис.4. СЭМ фотография скола волновода после этапа РИПТ

Для сглаживания рельефа, полученного в процессе РИПТ, проводилась вторая стадия — травление в индуктивно связанной плазме. Во время данной операции плазма в реакторе возбуждалась исключительно ИСП источником без подачи ВЧ смещения. В процессе травления использовался только газ CF_4 , расход которого составлял 80 sccm. Давление в камере реактора соответствовало 5 Па, мощность ИСП источника составляла 200 Вт. Травление осуществлялось в течение 5 минут.

В результате получена пластина, содержащая набор оптических волноводов с различной длиной и шириной волноводной полоски: 0,5 мкм; 1 мкм; 1,5 мкм. Период решетки элементов ввода-вывода соответствовал 1 мкм.

Качество полученных волноводов оценивалось методом сканирующей электронной микроскопии. Основным критерием оценки являлся профиль и морфология вытравленного рельефа. Результаты представлены на рис.5.

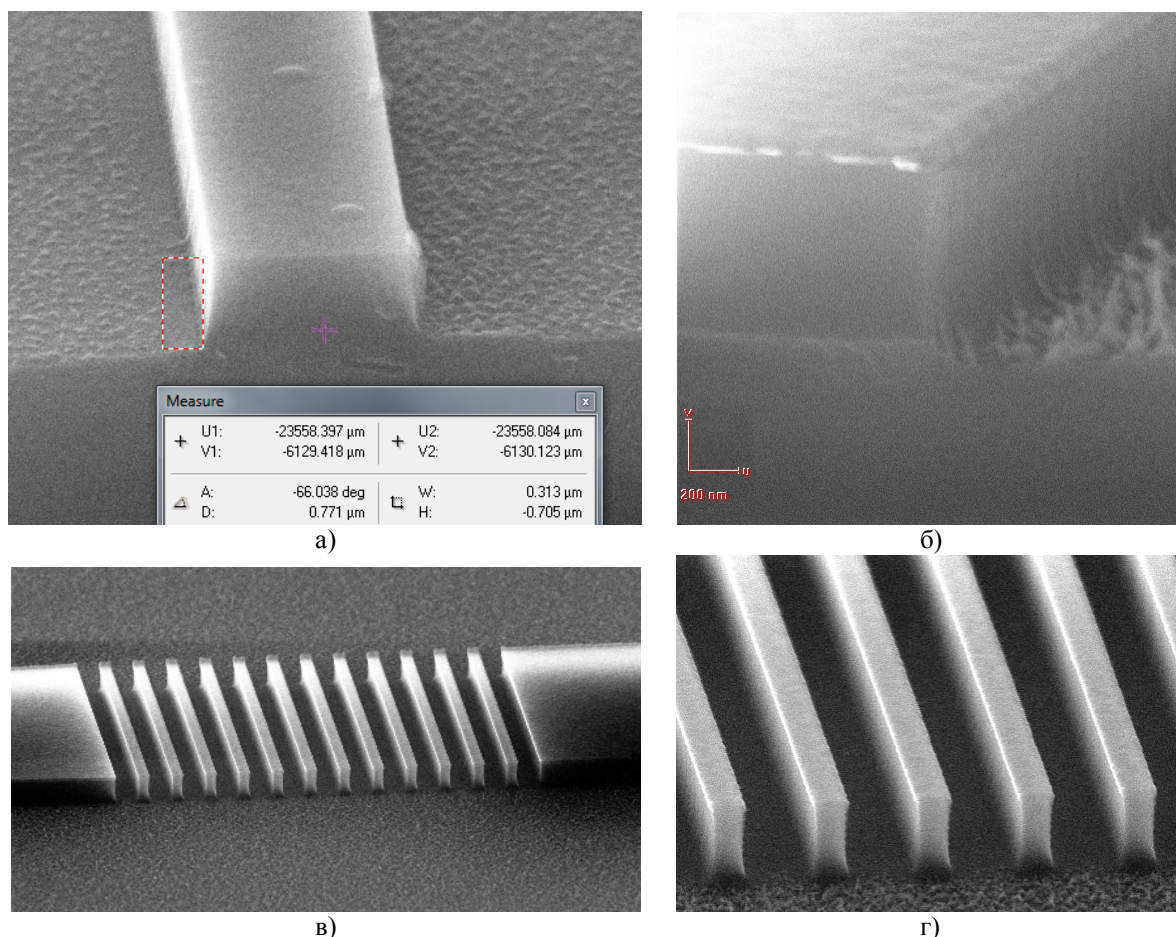


Рис.5. СЭМ фотографии полученных структур: а) поперечный скол волноводной полоски; б) вид на стенку волноводной полоски; в) общий вид решеточного элемента связи; г) увеличенный вид решетки

В результате анализа выявлено, что стенки полученных волноводов образуют прямоугольный профиль с вертикальными стенками. Также на фотографиях отчетливо видно, что стенки вытравленного рельефа обладают гладкой морфологией, формируя качественное зеркало на границе раздела сред. Наблюдается улучшение рельефа поверхности в результате использования травления в ИСП. На фотографии увеличенного вида решетки видно, что морфология поверхности между штрихами гладкая без включений, что в свою очередь должно положительно сказаться на эффективности полученных элементов ввода и вывода излучения.

Заключение

В результате проведенных исследований были рассмотрены тонкопленочные полосковые оптические волноводы, а также решеточные элементы связи, применяемые для осуществления ввода и вывода излучения в волноводный слой. Разработаны топология и технология получения таких элементов. В качестве исходной структуры использовалась подложка кремния со сформированными на поверхности пленками оксида кремния и нитрида кремния. На данной структуре были получены и исследованы образцы полосковых волноводов. Разработана двухстадийная операция плазмохимического травления с использованием различных методов формирования плазмы. В ре-

зультате исследований методами сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии установлено, что разработанная технология позволяет получать полосковые волноводы с решеточными элементами ввода-вывода с гладкой морфологией поверхности и четким прямоугольным профилем вытравленного рельефа. Для дальнейшей оценки необходимо проведение измерений оптических характеристик изготовленных образцов.

Публикация подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проектной части государственного задания, проект №3.3572.2017/ПЧ.

1. Никоноров Н.В., Шандаров С.М. Волноводная фотоника: Учебное пособие. СПб., 2008. 138 с.
2. Шилов И.П., Кочмарев Л.Ю., Ключник Н.Т., Яковлев М.Я. Планарные волноводы градиентного типа на основе наноразмерных слоев кварцевого стекла, полученные в микро-волновой плазме пониженного давления // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2012. №4(60). С.59-64.
3. Томов А.В., Филиппов В.В., Бондаренко В.П. Волноводные свойства оптических структур, полученных окислением пористого кремния // Письма в ЖТФ. 1997. Т.23. №10. С.86-89.
4. Ming-Chun Tien, Jared F. Bauters, Martijn J. R. Heck, et al. Ultra-low loss Si₃N₄ waveguides with low nonlinearity and high power handling capability // Optics Express. 2010. Vol.18. №23. 7 p.

5. Clemens Krüchel. Integrated Nonlinear Optics in Silicon Nitride Waveguides // *Optics Express*. 2015. Vol.23. №20. P.27-28.
6. Dakes M.L. Grating Coupler for Efficient Excitation of Optical Guided Waves in Thin Films // *Applied Physics Letters*. 1970. Vol.16. №12. P.523-525.
7. Waldhausl R. et al. Efficient coupling into polymer waveguides by gratings // *Applied Optics*. 1997. Vol.36. №36. P 9383-9384.

References

1. Nikonorov N.V., Shandarov S.M. *Volnovodnaia fotonika [Waveguide photonics]*. Saint Petersburg, ITMO University Publ., 2008. 138 p.
2. Shilov I.P., Kochmarev L.Iu., Kliuchnik N.T., Iakovlev M.Ia. Planarnye volnovody gradientnogo tipa na osnove nanorazmernykh sloev kvartseвого стекла, poluchennye v mikrovolnovoi plazme ponizhennogo davleniia [Gradient planar optical waveguides on the basis of fluorinated silica glasses fabricated in low pressure microwave plasma]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Materialy*

elektronnoi tekhniki – *Materials of Electronics Engineering*, 2012, no. 4(60), pp. 59-64.

3. Tomov A.V., Filippov V.V., Bondarenko V.P. Volnovodnye svoistva opticheskikh struktur, poluchennykh okisleniem poristogo kremniia [Waveguide properties of optical structures fabricated by oxidation of porous silicon]. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki (Pis'ma v ZhTF) – Technical Physics Letters*, 1997, vol. 23, no. 10, pp. 86-89.
4. Ming-Chun Tien, Jared F. Bauters, Martijn J.R. Heck, Daniel J. Blumenthal, John E. Bowers. Ultra-low loss Si₃N₄ waveguides with low nonlinearity and high power handling capability. *Optics Express*, 2010, vol. 18, no. 23. 7 p.
5. Clemens Krüchel. Integrated nonlinear optics in silicon nitride waveguides. *Optics Express*, 2015, vol. 23, no. 20, pp. 27-28.
6. Dakes M.L. Grating coupler for efficient excitation of optical guided waves in thin films. *Applied Physics Letters*, 1970, vol. 16, no. 12, pp. 523-525.
7. Waldhausl R. et al. Efficient coupling into polymer waveguides by gratings. *Applied Optics*, 1997, vol. 36, no. 36, pp. 9383-9384.