



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ БОКОВЫХ СТЕНОК СВЕТОВОДНОГО СЛОЯ ИЗ Si_3N_4 РАЗЛИЧНОЙ ТОЛЩИНЫ НА ОПТИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В ИНТЕГРАЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ, СФОРМИРОВАННОМ НА КВАРЦЕВОЙ ПОДЛОЖКЕ

INVESTIGATION OF THE SIDE WALLS ROUGHNESS EFFECT OF THE Si_3N_4 LIGHTGUIDE LAYER OF DIFFERENT THICKNESS ON OPTICAL LOSSES IN AN INTEGRAL WAVEGUIDE FORMED ON A QUARTZ SUBSTRATE

А.В.Якухина*, науч. сотр., (ORCID: 0000-0002-0729-9653), Д.В.Горелов*, мл. науч. сотр., (ORCID: 0000-0002-0887-9406), А.С.Кадочкин*, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., (ORCID: 0000-0002-7960-1583), С.С.Генералов*, нач. лаб., (ORCID: 0000-0002-7455-7800), В.В.Амеличев*, к.т.н., нач. отдела, (ORCID: 0000-0002-4204-2626), В.В.Светухин*, д.ф.-м.н., проф., директор, (ORCID: 0000-0003-0831-9254) / V.Amelichev@tcen.ru
A.V.Yakuhina*, Researcher, D.V.Gorelov*, Junior Researcher, A.S.Kadochkin*, Cand. of Sc. (Technical), Senior Researcher, S.S.Generalov*, Head of the Laboratory, V.V.Amelichev*, Cand. of Sc. (Technical), Head of department, V.V.Svetukhin*, Doctor of Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Director of SMC Technological Centre

DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.7-8.450.457

Получено: 23.11.2020 г.

В настоящей статье представлены результаты исследования влияния шероховатости боковых стенок световодного слоя из нитрида кремния толщиной 100 и 200 нм на оптические потери в интегральных волноводах шириной 3 и 8 мкм. Представлен расчет основных параметров шероховатости боковых стенок световодного слоя, оказывающих наибольшее влияние на оптические потери в волноводе, проведенный методом конечных временных разностей. На основании данного расчета была установлена оптимальная толщина световодного слоя из нитрида, позволяющая удерживать световой поток. За основу расчета при построении модели были взяты данные, полученные в ходе исследования РЭМ-снимков, изготовленных волноводных структур. Результаты приведенных расчетов согласуются с данными, полученными в результате исследования посредством рефлектометрии в частотной области рефлектометра обратного рассеяния изготовленных волноводов с толщиной световодного слоя из нитрида кремния 200 нм и шириной 3 и 8 мкм.

This article presents results of the influence of the side walls roughness of the 100 nm and 200 nm silicon nitride. Calculation of the main parameters of the side walls roughness of the lightguide layer, which have the greatest effect on the optical loss in the waveguide, carried out by finite difference time domain method (FDTD), is presented. Based on this calculation, the

* Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Научно-производственный комплекс "Технологический центр" / Scientific-Manufacturing Complex Technological Centre.



optimal thickness of the lightguide layer of nitride was established, allowing the light flow to be retained. Calculation of the model was based on the data obtained during the study of SEM images of manufactured waveguide structures. The results of these calculations are consistent with the data obtained using optical frequency domain reflectometry (OFDR) in the optical backscatter reflectometer (OBR) of manufactured waveguides with a thickness of silicon nitride 200 nm and width of 3 μm and 8 μm .

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время стремительно нарастающий темп развития современных систем обработки информации породил тренд к совершенствованию способов их реализации. Постоянно растущие объемы данных, передаваемых по волоконно-оптическим линиям связи, стали движущей силой обширных исследований и разработок в области технологии фотонных интегральных схем (ФИС) [1]. По сравнению с оптоволоконными системами фотонные интегральные схемы могут обеспечить улучшенную производительность и стабильность при меньших габаритах и более низкой стоимости [2]. Использование ФИС позволяет решать важные проблемы в области передачи данных, используя масштаб интеграции для снижения стоимости, занимаемой площади, мощности и повышения производительности [3]. Хотя оптическая связь является одним из основных приложений и основным двигателем фотонной интеграции, активное использование ФИС также можно найти в таких областях применения, как зондирование [4], спектроскопия [5],

рамановская спектроскопия [6], оптическая когерентная томография [7], биохимические сенсоры [8–10] и оборонный комплекс [11]. Одним из значимых преимуществ ФИС является совместимость со стандартными кремниевыми технологиями. Это делает возможным изготовление изделий кремниевой фотоники с использованием стандартных технологических процессов в рамках уже существующих производственных площадок, преимущественно загруженных производством электронных интегральных схем. Такой подход позволяет минимизировать возможные финансовые затраты, связанные с запуском специализированного производства [12].

Успешная реализация ФИС в значительной степени зависит от используемых материалов и процессов изготовления. Например, для правильной работы устройства необходимо точно контролировать показатель преломления и толщину материала [13]. Такие процессы, как травление и осаждение, должны быть оптимизированы для минимизации шероховатости поверхности оптических волноводных структур и поглощения

INTRODUCTION

Recently, the rapidly growing pace of development of modern information processing systems has given rise to a trend towards improving the methods of their implementation. The ever-growing amount of data transmitted over fiber-optic communication lines has been the driving force behind extensive research and development in photonic integrated circuit (PIC) technology [1]. Compared to fiber optic systems, photonic integrated circuits can provide improved performance and stability with a smaller footprint and lower cost [2]. The use of PIC allows you to solve important problems in the field of data transmission, using the scale of

integration to reduce the cost, occupied space and power, and increase productivity [3]. Although optical communication is one of the main applications and the main driver of photon integration, active use of PIC can also be found in such applications as sensing [4], spectroscopy [5], Raman spectroscopy [6], optical coherence tomography [7], biochemical sensors [8–10] and the defense complex [11]. One of the significant advantages of PIC is its compatibility with standard silicon technologies. This makes it possible to manufacture silicon photonics products using standard technological processes within existing production sites, predominantly loaded with the production

of electronic integrated circuits. This approach allows you to minimize possible financial costs associated with the launch of specialized production [12].

Successful implementation of FIS is highly dependent on the materials and manufacturing processes used. For example, for the device to function properly, it is necessary to accurately control the refractive index and material thickness [13]. The processes such as etching and deposition must be optimized to minimize surface roughness of optical waveguide structures and material absorption. Therefore, a careful choice of material and manufacturing method is an important



материала. Поэтому тщательный выбор материала и способа изготовления является важным шагом к серийному производству ФИС.

Оптимальными с точки зрения совместимости с кремниевыми технологиями являются интегральные оптические волноводные структуры (ИОВС), в которых в качестве световодного слоя используется Si, SiO₂ и Si₃N₄. В то время как основные материалы интегральной технологии кремний и диоксид кремния обычно страдают от высоких потерь или делокализованных оптических режимов, Si₃N₄ обеспечивает преимущества как высокого удержания светового потока, так и высокой добротности [14–18]. Помимо этого, нитрид кремния обладает рядом нелинейных свойств, таких как параметрическое усиление [19], широкополосная генерация суперконтинуума [20] и прозрачность в ближней инфракрасной и видимой областях спектра [21]. Такие свойства предоставляют широкий спектр новых возможностей применения нитрида кремния в ФИС.

Таким образом, обоснование выбора толщины световодного слоя 200 нм из нитрида кремния для изготовления симметричных волноводных структур с оболочкой из оксида кремния является одной из актуальных задач на начальном этапе создания ФИС. Поэтому, на основании ранее описанного метода расчета влияния различных параметров шероховатости [22] приводим новые результаты исследования величины оптических потерь для волноводов различной толщины (100 и 200 нм).

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведения ряда экспериментов, в ходе которых на кремниевых и кварцевых подложках были сформированы пленки из осажденного LPCVD нитрида кремния различной толщины, был сделан вывод о том, что данные пленки обладают высоким оптическим качеством. Пленки нитрида кремния с низким уровнем механического напряжения могут быть выращены с помощью плазменно-усиленного химического осаждения из паровой фазы (PECVD) и модифицированных процессов химического осаждения из паровой фазы низкого давления (LPCVD), но пленки при этом получают с более высоким уровнем поглощения, вызванным оборванными связями Н и О с Si и N в ИОВС [23]. В связи с этим, для определения оптимальной толщины пленки нитрида кремния, обеспечивающей максимальную локализацию светового потока, необходимо комплексное исследование ряда конструктивных и технологических параметров.

На первом этапе исследования с целью определения текущего состояния технологического процесса формирования световодного слоя из нитрида кремния были изготовлены тестовые образцы симметричных интегральных волноводов со световодным слоем из нитрида кремния на кварцевой подложке. На всех этапах изготовления данных волноводов, для осуществления контроля качества выполненных операций, одновременно с рабочими структурами на кварцевых подложках все технологические операции выполнялись также и на контрольных кремниевых пластинах. Это позволило получить наглядные

step towards the serial production of FIS.

Integral optical waveguide structures (IWFs), where Si, SiO₂, and Si₃N₄ are used as the fiber layer, are optimal from the point of view of compatibility with silicon technologies. While the main materials of the integrated technology – silicon and silicon dioxide – usually suffer from high losses or delocalized optical modes, Si₃N₄ provides the advantages of both high luminous flux retention and high Q factor [14–18]. In addition, silicon nitride has a number of nonlinear properties, such as parametric amplification [19], broadband

supercontinuum generation [20], and transparency in the near infrared and visible spectral regions [21]. These properties provide a wide range of new possibilities for using silicon nitride in FIS.

Thus, the substantiation of the choice of the 200 nm silicon nitride fiber layer thickness for the fabrication of symmetric waveguide structures with a silicon oxide cladding is one of the urgent problems at the initial stage of creating a PIC. Therefore, on the basis of the previously described method for calculating the influence of various roughness parameters [22], we present new results of studying

the magnitude of optical losses for waveguides of different thicknesses (100 nm and 200 nm).

RESEARCH METHODS AND RESULTS

As a result of a series of experiments, in the course of which films of various thicknesses of deposited silicon nitride LPCVD were formed on silicon and quartz substrates, it was concluded that these films have high optical quality. Low stress silicon nitride films can be grown using Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) and Modified Low Pressure Chemical Vapor Deposition (LPCVD) processes, but these films result in

снимки профиля диэлектрической структуры при помощи растрового электронного микроскопа, которые представлены на рис.1 [22]. Данные о шероховатости, полученные в ходе анализа этих РЭМ-снимков, легли в основу расчета, проведенного методом конечных временных разностей.

Подробно процесс формирования симметричного интегрального волновода, а также метод расчета критически значимых параметров шероховатости боковой стенки световодного слоя из нитрида кремния был описан ранее в работе [22]. Наиболее значимым, с точки зрения минимизации эффекта рассеяния светового потока из-за несовершенства границ раздела, является способ формирования световодного слоя из нитрида кремния. Поэтому для оценки текущего состояния технологического процесса его формирования был проведен анализ боковой поверхности стенок нитрида кремния схожих контрольных структур, полученных на кремниевых пластинах в одном процессе с исследуемыми образцами, на растровом электронном микроскопе (РЭМ). Такой способ оценки был выбран ввиду того, что при исследовании диэлектрических структур, каковыми по сути являются описываемые нами волноводы, в растровом электронном микроскопе происходит накопление заряда в диэлектрических

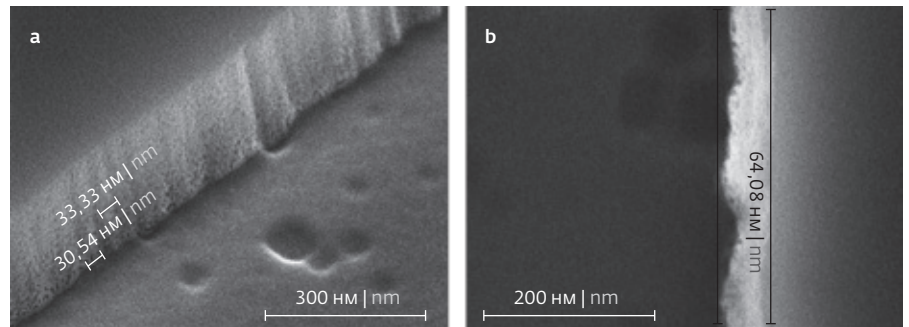


Рис.1. РЭМ-снимок боковой поверхности стенок профиля нитрида кремния после операции плазмохимического травления: вид сбоку (а); вид сверху (б) [22]
Fig.1. SEM image of the silicon nitride side surface profile after plasma-chemical etching: side view (a); view from above (b) [22]

слоях, что вызывает "засветку" кадра и препятствует проведению анализа. В результате было выявлено, что шероховатость боковой стенки профиля травления нитрида кремния имеет волнообразную форму с периодом порядка 30 нм и амплитудой 10–20 нм [22].

Для расчета влияния шероховатости боковых стенок световодного слоя нитрида кремния на оптические потери в многомодовом оптическом волноводе был использован метод конечных временных разностей (FDTD). За основу были взяты данные, полученные при исследовании шероховатости световодного слоя ранее изготовленных волноводов. Параметры σ (среднеквадратичное отклонение шероховатости) и δ (продольный размер шероховатости), используемые для расчета, четко представлены на рис. 2 [22].

higher absorption levels caused by dangling bonds of H and O with Si and N in IOBS [23]. In this regard, to determine the optimal thickness of the silicon nitride film, which provides the maximum localization of the light flux, it is necessary to comprehensively study a number of design and technological parameters.

At the first stage of the study, in order to determine the current state of the technological process of the silicon nitride fiber layer formation test samples of symmetric integrated waveguides with a silicon nitride fiber layer on a quartz substrate were made. At all fabrication

stages of these waveguides, in order to control the quality of the operations performed, simultaneously with the working structures on quartz substrates, all technological operations were also performed on the control silicon wafers. This made it possible to obtain visual images of the dielectric structure profile using a scanning electron microscope, which are shown in Fig.1 [22]. The roughness data obtained during the analysis of these SEM images formed the basis for the calculation carried out by the finite time difference method.

The process of forming a symmetric integral waveguide as well

as a method for calculating the critical parameters of the side wall roughness of a silicon nitride fiber layer were described in detail in [22]. The most significant from the viewpoint of minimizing the effect of light flux scattering, due to the imperfection of the interfaces, is the method of forming a fiber layer of silicon nitride. Therefore, to assess the current state of the technological process of its formation, we analyzed the lateral surface of the silicon nitride walls of similar control structures obtained on silicon wafers in the same process with the samples under study using a scanning electron

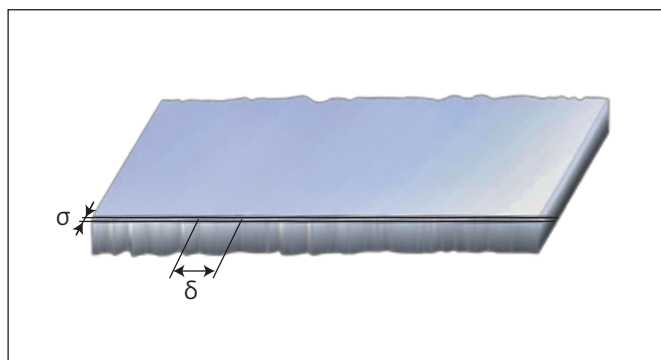


Рис.2. Моделирование волновода с шероховатыми стенками. Материал волновода – нитрид кремния ($n = 2,00$), материал окружающей среды – оксид кремния ($n = 1,46$)

Fig.2. Modeling of a waveguide with rough walls. The light-guide material is silicon nitride ($n = 2.00$), and the cladding material is silicon oxide ($n = 1.46$)

Для оценки достоверности предложенного метода изготовленные интегральные волноводы были исследованы при помощи рефлектометрии частотной области (OFDR) рефлектометра обратного рассеяния (OBR). Метод обратного рассеяния основан на введении в волноводную структуру импульсного оптического излучения и последующем анализе той малой части светового потока, которая возвращается на приемник в результате обратного рассеяния и отражений распространяющейся в волокне световой волны [24]. Данный метод является оптимальным при решении задач, требующих, как в нашем случае, сочетания высокой скорости,

чувствительности и разрешения при анализе коротких и промежуточных длин линий передачи [25]. Расчетные данные и данные, полученные в результате оценки рефлектограмм хорошо согласуются, что позволяет говорить о достоверности предложенного метода [22]. В связи с этим для определения влияния аналогичных параметров шероховатости боковых стенок в волноводе с толщиной световодного слоя из нитрида кремния 100 нм был проведен расчет указанным методом.

Также для определения степени локализации светового потока в исследуемых волноводах различной ширины и с различной толщиной световодного слоя был проведен расчет распределения напряженности электрического поля методом конечного элементного анализа. Данный расчет необходим для определения оптимальной конструкции интегрального волновода с точки зрения удержания светового потока внутри световедущего слоя, иными словами – обеспечения максимального времени жизни фотона внутри волновода. Это является важнейшим критерием, в частности, для реализации на основе таких волноводов высокодобротных резонансных структур.

Результаты расчета методом конечных временных разностей представлены в сводной табл.1, включающей значения, полученные для волновода со световедущим слоем из нитрида кремния толщиной 100 и 200 нм.

Исходя из полученных данных можно сделать вывод о том, что при снижении толщины световодного слоя из нитрида кремния величина

microscope (SEM). This method of assessment was chosen due to the fact that when studying dielectric structures, which are essentially the waveguides we are describing, in a scanning electron microscope, a charge accumulates in the dielectric layers which causes the frame to be "exposed" and interferes with the analysis. As a result, it was revealed that the roughness of the side wall of the silicon nitride etching profile has a wavy shape with a period of about 30 nm and amplitude of 10–20 nm [22].

The finite time difference method (FTDM) was used to calculate the effect of the sidewall

roughness of the silicon nitride fiber layer on optical loss in a multimode optical waveguide. The data obtained in the study of the fiber layer roughness of the previously fabricated waveguides were taken as a basis. The parameters σ (root-mean-square roughness deviation) and δ (longitudinal roughness size) used for the calculation are clearly shown in Fig. 2 [22].

To assess reliability of the proposed method, the fabricated integrated waveguides were studied using frequency domain reflectometry (OFDR) of a backscatter reflectometer (OBR). The backscattering method is based on introduction

of pulsed optical radiation into the waveguide structure and the subsequent analysis of that small part of the light flux that returns to the receiver as a result of backscattering and reflections of the light wave propagating in the fiber [24]. This method is optimal for solving problems that require, as in our case, a combination of high speed, sensitivity and resolution in the analysis of short and intermediate lengths of transmission lines [25]. The calculated data and the data obtained as a result of evaluating the reflectograms are in good agreement, which allows us to speak about the reliability of



Таблица 1. Сравнение измеренного и рассчитанного затухания моды TE_{00} в интегральных волноводах со световодным слоем из нитрида кремния толщиной 100 и 200 нм, σ – среднеквадратичное отклонение шероховатости, δ – продольный размер шероховатости

Table 1. Comparison of the measured and calculated attenuation of the TE_{00} mode in integrated waveguides with a silicon nitride fiber layer 100 nm and 200 nm thick, σ is the root-mean-square deviation of the roughness, δ is the longitudinal roughness size

Ширина волновода, мкм Waveguide width, μm	Величина оптических потерь (измеренная), дБ/см Optical loss (measured), dB/cm	Толщина Si_3N_4 световодного слоя 200 нм Thickness of Si_3N_4 lightguide 200 nm layer			Толщина Si_3N_4 световодного слоя 100 нм Thickness of Si_3N_4 lightguide 100 nm layer		
		σ , нм nm	δ , нм nm	Величина оптических потерь (расчетная), дБ/см Optical loss (calculated), dB/cm	σ , нм nm	δ , нм nm	Величина оптических потерь (расчетная), дБ/см Optical loss (calculated), dB/cm
3.00	1.43	30.00	20.00	1.63	30.00	20.00	5.19
		10.00	20.00	0.22	10.00	20.00	4.35
8.00	0.31	30.00	20.00	0.11	30.00	20.00	1.91
		10.00	20.00	0.01	10.00	20.00	1.85

оптических потерь возрастает в разы. По сути, можно сказать, что световой поток полностью переходит в оболочку. Данный вывод также подтверждается результатами расчета методом конечных элементов, наглядно представленными на рис.3.

В результате проведенных расчетов было установлено, что снижение величины среднеквадратичного отклонения шероховатости даже при условии

сохранения величины ее продольного размера приводит к снижению величины оптических затуханий в волноводе со световодным слоем из нитрида кремния толщиной как 200 нм, так и 100 нм. Это вновь подтверждает вывод о влиянии шероховатости боковых стенок световодного слоя на величину оптических затуханий в волноводе. Однако, в случае использования волновода с толщиной световодного

the proposed method [22]. In this regard, in order to determine the effect of similar parameters of the roughness of the side walls in a waveguide with a silicon nitride fiber layer thickness of 100 nm, a calculation was performed using the indicated method.

Also, to determine the degree of the light flux localization in the studied waveguides of different widths and of different thicknesses of the fiber layer, the electric field strength distribution was calculated by the finite elemental analysis method. This calculation is necessary to determine the optimal design of the integral waveguide

from the viewpoint of keeping the light flux inside the light guide layer, in other words, ensuring the maximum photon lifetime inside the waveguide. This is the most important criterion, in particular, for the implementation of high-Q resonant structures based on such waveguides.

The results of the calculation by the finite time difference method are presented in the summary Table 1, including the values obtained for a waveguide with a light guiding layer of 100 nm and 200 nm thick silicon nitride.

Based on the data obtained, it can be concluded that with a

decrease in thickness of the silicon nitride fiber layer, the magnitude of optical losses increases significantly. In fact, we can say that the luminous flux completely passes into the shell. This conclusion is also confirmed by the results of the calculation by the finite element methods, which are clearly shown in Fig.3.

As a result of the calculations, it was found that a decrease in the value of the root-mean-square deviation of the roughness, even if the value of its longitudinal size is preserved, leads to a decrease in the value of optical attenuation in a waveguide with a silicon nitride

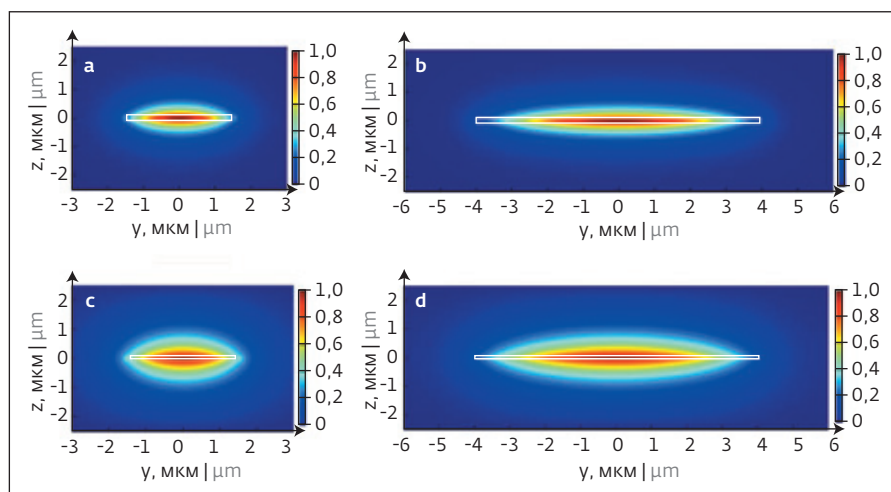


Рис.3. Распределение нормированной амплитуды электрического поля (мода TE_{00}) в волноводах различной ширины с различной толщиной Si_3N_4 световодного слоя: а – шириной 3 мкм и толщиной 200 нм, б – шириной 8 мкм и толщиной 200 нм, с – шириной 3 мкм и толщиной 100 нм, д – шириной 8 мкм и толщиной 100 нм

Fig.3. Allocation of the normalized amplitude of electric field (mode TE_{00}) in waveguides of different widths with different thicknesses of the Si_3N_4 lightguide layer: а – 3 μm wide and 200 nm thick, б – 8 μm wide and 200 nm thick, с – 3 μm wide and 100 nm thick, д – 8 μm wide and 100 nm thick

слоя 100 нм световой поток не будет локализован в достаточной степени, вне зависимости от характеристики боковых стенок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И БЛАГОДАРНОСТИ

Проведенные расчеты подтвердили сделанный ранее [22] вывод о положительном влиянии

fiber layer with a thickness of both 200 nm and 100 nm. This confirms the conclusion about the effect of roughness of the side walls of the fiber layer on the value of optical attenuation in the waveguide too. However, in the case of using a waveguide with a 100 nm light guide layer, the luminous flux will not be sufficiently localized regardless of the characteristics of the side walls.

CONCLUSIONS AND ACKNOWLEDGEMENTS

The performed calculations have confirmed the conclusion made earlier in [22] about a positive effect

of reducing the root-mean-square deviation of the sidewall roughness of the Si_3N_4 fiber layer even if the value of its longitudinal size is preserved on the value of optical losses in the integrated waveguide. At the same time, it was found that a decrease in the thickness of the Si_3N_4 film, from which the light guide layer is subsequently formed, to 100 nm leads to delocalization of the light flux. This suggests that in order to form integrated waveguides with a minimum optical loss, it is necessary to improve the methods of forming the fiber layer, as well as to pay special attention to its thickness.

снижения среднеквадратичного отклонения шероховатости боковых стенок Si_3N_4 световодного слоя даже при условии сохранения величины ее продольного размера на величину оптических потерь в интегральном волноводе. Одновременно с этим было установлено, что уменьшение толщины пленки Si_3N_4 , из которой впоследствии формируется световодный слой, до 100 нм приводит к делокализации светового потока. Это говорит о том, что для формирования интегральных волноводов с минимальной величиной оптических потерь необходимо совершенствовать способы формирования световодного слоя, а также уделять особое внимание его толщине.

Настоящая статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания на 2019 год (проект № 0Н59-2019-0020) "Теоретические и экспериментальные исследования конструктивно-технологических методов создания интегральных оптических элементов, совместимых с кремниевой технологией". При выполнении работы использовалось оборудование центра

This article was prepared with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the state assignment for 2019 (project No. 0N59-2019-0020) "Theoretical and experimental studies of constructive and technological methods for creating integrated optical elements compatible with silicon technology." When performing the work, the equipment of the collective use center "Functional control and diagnostics of micro- and nanosystem equipment" on the basis of the SMC "Technological Center" was used. ■

коллективного пользования "Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники" на базе НПК "Технологический центр".

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. **Muellner P.** et al. CMOS-compatible Si₃N₄ waveguides for optical biosensing // *Procedia Engineering*. 2015. V. 120. С. 578-581.
2. **Bauters J.F.** et al. Ultra-low-loss high-aspect-ratio Si₃N₄ waveguides // *Optics express*. 2011. V. 19. No. 4. PP. 3163-3174.
3. **Heck M.J. R.** et al. Hybrid silicon photonic integrated circuit technology // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2012. V. 19. No. 4. PP. 6100117-6100117.
4. **Pozo J., Harmsma P., Cascio D.M.** R. L. Application specific photonic integrated circuits and the sensing industry // 2013 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON) // *IEEE*, 2013. PP. 1-1.
5. **Martens D.** et al. Compact silicon nitride arrayed waveguide gratings for very near-infrared wavelengths // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2014. V. 27. No. 2. PP. 137-140.
6. **Dhakal A.** et al. Evanescent excitation and collection of spontaneous Raman spectra using silicon nitride nanophotonic waveguides // *Optics letters*. 2014. V. 39. No. 13. PP. 4025-4028.
7. **Yurtsever G.** et al. Photonic integrated Mach-Zehnder interferometer with an on-chip reference arm for optical coherence tomography // *Biomedical optics express*. 2014. V. 5. No. 4. PP. 1050-1061.
8. **Ymeti A.** et al. Fast, ultrasensitive virus detection using a young interferometer sensor // *Nano letters*. 2007. V. 7. No. 2. PP. 394-397.
9. **Ghasemi F.** et al. Self-referenced silicon nitride array microring biosensor for toxin detection using glycans at visible wavelength // *Nanoscale Imaging, Sensing, and Actuation for Biomedical Applications X*. - International Society for Optics and Photonics, 2013. V. 8594. P. 85940A.
10. **Liu Q.** et al. Highly sensitive Mach-Zehnder interferometer biosensor based on silicon nitride slot waveguide // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2013. V. 188. P. 681-688.
11. **Roeloffzen C.G. H.** et al. Integrated optical beamformers // *Optical Fiber Communication Conference*. - Optical Society of America, 2015. P. Tu3F. 4.
12. **Baets R.** et al. Silicon Photonics: silicon nitride versus silicon-on-insulator // *Optical Fiber Communication Conference*. - Optical Society of America, 2016. P. Th3J. 1.
13. **Moreira R.L.** Integrated optical delay line circuits on a ultra-low loss planar waveguide platform. - University of California, Santa Barbara, 2016.
14. **Hosseini E.S.** et al. High quality planar silicon nitride microdisk resonators for integrated photonics in the visiblewavelength range // *Optics express*. 2009. V. 17. No. 17. P. 14543-14551.
15. **Cirino G.A.** et al. Simulation and fabrication of silicon nitride microring resonator by DUV lithography // 2016 31st Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro) // *IEEE*, 2016. PP. 1-4.
16. **Daldosso N.** et al. Comparison among various Si₃N₄/waveguide geometries grown within a CMOS fabrication pilot line // *Journal of Lightwave Technology*. 2004. V. 22. No. 7. PP. 1734-1740.
17. **Gorin A.** et al. Fabrication of silicon nitride waveguides for visible-light using PECVD: a study of the effect of plasma frequency on optical properties // *Optics Express*. 2008. T. 16. No. 18. PP. 13509-13516.
18. **Gondarenko A., Levy J.S., Lipson M.** High confinement micron-scale silicon nitride high Q ring resonator // *Optics express*. 2009. V. 17. No. 14. PP. 11366-11370.
19. **Pfeifle J.** et al. Microresonator-based optical frequency combs for high-bitrate WDM data transmission // *Optical Fiber Communication Conference*. - Optical Society of America, 2012. P. OW1C. 4.
20. **Halir R.** et al. Ultrabroadband supercontinuum generation in a CMOS-compatible platform // *Optics letters*. 2012. V. 37. No. 10. PP. 1685-1687.
21. **Romero-García S.** et al. Silicon nitride CMOS-compatible platform for integrated photonics applications at visible wavelengths // *Optics express*. 2013. V. 21. No. 12. PP. 14036-14046.
22. **Yakuhina A.** et al. Investigation of Side Wall Roughness Effect on Optical Losses in a Multimode Si₃N₄ Waveguide Formed on a Quartz Substrate // *Photonics*. - Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. V. 7. No. 4. P. 104.
23. **Luke K.** et al. Overcoming Si₃N₄ film stress limitations for high quality factor ring resonators // *Optics express*. 2013. V. 21. No. 19. PP. 22829-22833.
24. **Былина М.С.** и др. Измерение параметров волоконно-оптических линейных трактов. Учебное пособие // СПб: СПб ГУТ, 2002.
25. **Soller B.J.** et al. High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies // *Optics express*. 2005. V. 13. No. 2. PP. 666-674.