



# Исследование технологии осаждения пленок нитрида кремния для применения в фотонных интегральных схемах

А. А. Никитин<sup>1</sup>, К. О. Воропаев<sup>3</sup>, А. А. Ершов<sup>1</sup>, И. А. Рябцев<sup>1</sup>,  
А. В. Кондрашов<sup>1</sup>, М. В. Парфенов<sup>2</sup>, А. А. Семенов<sup>1</sup>,  
А. В. Шамрай<sup>2</sup>, Е. И. Геруков<sup>2</sup>, А. В. Петров<sup>3</sup>, А. Б. Устинов<sup>1</sup>

- <sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ) им. В. И. Ульянова (Ленина) Санкт-Петербург, Россия  
<sup>2</sup> Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия  
<sup>3</sup> АО «ОКБ-Планета», Великий Новгород, Россия

Статья посвящена технологии изготовления оптических микроволноводов из нитрида кремния. Для изготовления волноводных структур использовались кремниевые подложки с подслоем оксида кремния. На поверхности оксида кремния наносились пленки нитрида кремния методами плазмохимического газофазного осаждения и газофазного осаждения при пониженном давлении. Толщины пленок нитрида кремния изменялась в пределах от 710 до 730 нм в зависимости от технологии газофазного осаждения. Для создания волноводных структур использовалась фотолитография и плазмохимическое травление. Ширина волноводных структур варьировалась от 1 до 5 мкм с шагом 500 нм. На поверхности структур осаждался покрывной слой оксида кремния. В работе проведено исследование потерь на длине волны 1,55 мкм в волноводных структурах, изготовленных обоими методами газофазного осаждения. Приведено сравнение методов осаждения, в результате чего показано, что разработанный метод плазмохимического газофазного осаждения обеспечивает существенное уменьшение

# Study of Silicon Nitride Film Deposition Technology for Application in the Photonic Integrated Circuits

A. A. Nikitin<sup>1</sup>, K. O. Voropaev<sup>3</sup>, A. A. Ershov<sup>1</sup>, I. A. Ryabcev<sup>1</sup>,  
A. V. Kondrashov<sup>1</sup>, M. V. Parfenov<sup>2</sup>, A. A. Semenov<sup>1</sup>,  
A. V. Shamrai<sup>2</sup>, E. I. Terukov<sup>2</sup>, A. V. Petrov<sup>3</sup>, A. B. Ustinov<sup>1</sup>

- <sup>1</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia  
<sup>2</sup> Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia  
<sup>3</sup> OKB-Planeta JSC, Veliky Novgorod, Russia

The article is devoted to the production technology of optical micro-waveguides made of silicon nitride. The silicon substrates with a silicon oxide sublayer were used to produce the waveguide structures. The silicon nitride films were deposited on the silicon oxide surface by plasma-enhanced chemical vapor deposition and low-pressure chemical vapor deposition. The silicon nitride film thickness varied from 710 to 730 nm, depending on the chemical vapor deposition technology. Photolithography and reactive-ion etching were used to produce the waveguide structures. The waveguide structure width varied from 1 to 5  $\mu\text{m}$  with a pitch of 500 nm. A cladding layer of silicon oxide was deposited on the structure surface. This paper describes the study of losses at a wavelength of 1.55  $\mu\text{m}$  in the waveguide structures made by both chemical vapor deposition methods. A comparison of the deposition methods demonstrated that the developed method of plasma-enhanced chemical vapor deposition provided a significant reduction in the losses in structures compared to the low-pressure chemical vapor deposition.

**Keywords:** microwave photonics, photonic integrated circuits, silicon nitride, LPCVD, PECVD



**потерь в структурах по сравнению с методом газозаполненного осаждения при пониженном давлении.**

**Ключевые слова:** радиофотоника, фотонные интегральные схемы, нитрид кремния, LPCVD, PECVD

Статья получена: 16.05.2022

Статья принята: 03.06.2022

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из прорывных направлений развития современной сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники является интегральная радиофотоника [1, 2]. В настоящее время принципы радиофотоники активно используются для создания различных СВЧ-приборов и устройств в интегральном исполнении, например, фильтров, линий задержки, генераторов, синтезаторов и стандартов частоты [3-7]. Поэтому актуальной проблемой является разработка технологии изготовления фотонных интегральных схем (ФИС). Среди различных перспективных технологических платформ изготовления ФИС, таких как кремний на изоляторе [8-10], фосфид индия [11], особый интерес вызывает нитрид кремния [12-15]. Этот материал обеспечивает достаточно высокий контраст, необходимый для высокой плотности элементов на ФИС; сверхнизкие потери, величина которых достигает 0,01 дБ/см при радиусе закругления 80 мкм в полосе порядка одной октавы относительно телекоммуникационной длины волны 1,55 мкм; высокую керровскую нелинейность ( $n_2=2,4 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{Вт}$ ); малое нелинейное затухание, в частности отсутствие двухфотонного поглощения; кроме того нитрид кремния полностью совместим с КМОП-технологией изготовления интегральных схем. Благодаря перечисленным преимуществам нитрид кремния перспективен не только для создания пассивных линейных радиофотонных устройств, но и для нелинейных применений, таких как преобразование длины волны, генерация монохроматического сигнала, сетки частот, хаоса и суперконтинуума [16-19].

В настоящее время широкое распространение получили два способа изготовления пленок нитрида кремния. Первый – метод химического осаждения из газовой фазы в реакторах проточного типа низкого давления (в зарубежной литературе этот метод известен как LPCVD – *англ.* Low Pressure Chemical Vapor Deposition) [15, 20]. Понижение дав-

Article received: 16.05.2022

Article accepted: 03.06.2022

## 1. INTRODUCTION

One of the breakthrough aspects to develop in the modern microwave (MW) electronics is integrated microwave photonics [1, 2]. At present, the microwave photonics principles are actively used to develop various MW devices and integrated devices, for example, filters, delay lines, oscillators, synthesizers, and frequency standards [3-7]. Therefore, the topical issue is the development of production technology for the photonic integrated circuits (PICs). Silicon nitride is of particular interest [12-15] among various promising technological platforms for the PIC production, such as silicon-on-insulator [8-10], indium phosphide [11]. This material provides a sufficiently high contrast required for a high density of elements on the PICs; ultra-low losses, the value of which reaches 0.01 dB/cm at a bending radius of 80 microns in a band of the one octave order relative to the telecommunication wavelength of 1.55 microns; high Kerr-type nonlinearity ( $n_2=2.4 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2/\text{W}$ ); low nonlinear attenuation, in particular, absence of two-photon absorption. In addition, silicon nitride is fully compatible with CMOS integrated circuit technology. Due to the above advantages, silicon nitride is promising not only for the development of passive linear microwave photonic devices, but also for the nonlinear applications such as the wavelength conversion, monochromatic signal generation, frequency combs, chaos, and supercontinuum [16-19].

At present, two production methods for the silicon nitride films are widely used. The first method is the chemical vapor deposition in the low-pressure flow reactors (in foreign references, this method is known as LPCVD – Low Pressure Chemical Vapor Deposition) [15, 20]. A decrease in pressure (1-1000 mT) during the LPCVD process leads to an increased diffusion rate of reagents in the gas phase, as a result of which the film is formed in the kinetic control mode that ensures high uniformity and quality of the growing film. The limiting factor of this method is the need to use a high substrate temperature (450-1000 °C) providing the occurrence of chemical reactions on the growing film surface that leads to a decreased growth rate (2-5 nm/min), as well as to the need for precise temperature control on the substrate. The second method is the plasma-enhanced chemical vapor deposition (in foreign references, this method is known as PECVD – Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition). PECVD, in contrast to the expensive LPCVD



ления (1-1000 мТорр) в процессе LPCVD приводит к повышению скорости диффузии реагентов из газовой фазы, в результате чего пленка формируется в режиме кинетического контроля, что обеспечивает высокую однородность и качество растущей пленки. Ограничивающим фактором этого метода является необходимость использования высокой температуры подложки (450-1000 °С), обеспечивающей протекание химических реакций на поверхности растущей пленки, что приводит к снижению скорости роста (2-5 нм/мин.), а также к необходимости точного контроля температуры на подложке. Вторым методом является плазмохимическое осаждение из газовой фазы (в зарубежной литературе метод PECVD – *англ.* Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition). PECVD в отличие от дорогостоящего LPCVD-метода является более доступным методом осаждения пленок нитрида кремния со снятыми внутренними напряжениями вплоть до 1 мкм при значительно более высокой скорости осаждения (25-350 нм/мин.) и более низкой температуре около 25-500 °С [14, 21]. Поэтому целью настоящей работы являлось изготовление пленок нитрида кремния на подложках кремния с подслоем оксида кремния методами PECVD и LPCVD, а также сопоставление качества полученных пленок путем измерения ослабления оптического сигнала, распространяющегося в интегральных волноводах, изготовленных из этих пленок.

## 2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОВОЛНОВОДОВ

Технологический процесс изготовления оптических микроволноводов Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> шириной от 1 мкм до 5 мкм представлен на рис. 1. На первом этапе (см. рис. 1.1) на трехдюймовых кремниевых подложках методом термического окисления во влажном кислороде выращивалась пленка оксида кремния. Толщина и показатель преломления выращенного слоя SiO<sub>2</sub> были измерены с помощью эллипсометрии на длине волны 1550 нм и составляли 2,8 мкм и 1,44, соответственно. На втором этапе (см. рис. 1.2) методами LPCVD или PECVD происходило осаждение нитрида кремния.

а) Процесс PECVD осаждения проводился на установке Sentec SI 500D. В этом процессе использовалась 5% смесь силана SiH<sub>4</sub> с азотом (200 см<sup>3</sup>/мин) и чистый азот (5 см<sup>3</sup>/мин). Температура подложки в процессе осаждения составляла 250 °С, а давление поддерживалось на уровне 4 Па. Процесс осаждения проводился на частоте 13,56 МГц при мощности порядка 1000 Вт. Толщина и показатель прелом-

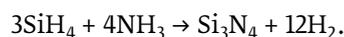
ления, является более доступным методом для осаждения пленки нитрида кремния с освобождением внутренних напряжений до 1 мкм при значительно более высокой скорости осаждения (25-350 нм/мин) и более низкой температуре около 25-500 °С [14, 21]. Поэтому целью настоящей работы являлось изготовление пленок нитрида кремния на подложках кремния с подслоем оксида кремния методами PECVD и LPCVD, а также сопоставление качества полученных пленок путем измерения ослабления оптического сигнала, распространяющегося в интегральных волноводах, изготовленных из этих пленок.

## 2. PRODUCTION TECHNOLOGY OF MICROWAVE GUIDES

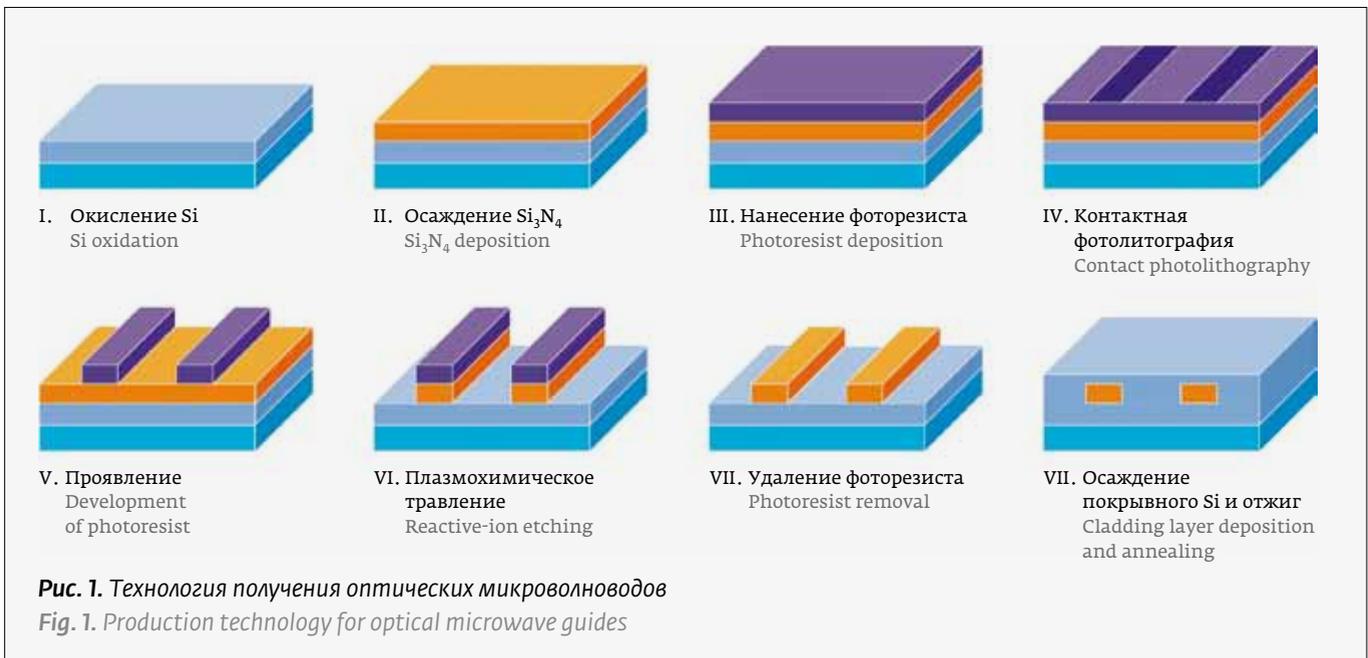
The production process for Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> optical micro-waveguides with a width of 1 μm to 5 μm is shown in Fig. 1. At the first stage (see Fig. 1.I), a silicon oxide film was grown on the three-inch silicon substrates by thermal oxidation in wet oxygen. The thickness and refractive index of the grown SiO<sub>2</sub> layer were measured using ellipsometry at a wavelength of 1550 nm. These values were equal to 2.8 μm and 1.44, respectively. At the second stage (see Fig. 1.II), silicon nitride was deposited using the LPCVD or PECVD methods.

a) The PECVD deposition process was performed using a Sentec SI 500D setup. This process was performed with 5% mixture of silane SiH<sub>4</sub> with nitrogen (200 cm<sup>3</sup>/min) and pure nitrogen (5 cm<sup>3</sup>/min). The substrate temperature during deposition was 250 °C, and the pressure was maintained at 4 Pa. The deposition process was carried out at a frequency of 13.56 MHz with a discharge power of 1000 W. The thickness and refractive index of the deposited film were measured using ellipsometry at a wavelength of 1550 nm. These values were 730 nm and 2.01, respectively.

b) In the LPCVD process, a low-pressure flow reactor and a diffusion furnace were used. The silicon nitride film was obtained by the following chemical reaction of silane and ammonia:

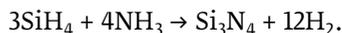


The following technological parameters were used in the deposition process: substrate temperature – 850 °C; pressure in the reactor – 45 Pa; the ratio of SiH<sub>4</sub>/NH<sub>3</sub> flows – 1/3. As a result, a silicon nitride film with the thickness of 712 nm was obtained. To measure the thickness and refractive index of the grown film, we used the ellipsometry method at a wavelength of 1550 nm. The selected process parameters provided the same refractive index of 2.01 as in the previous case.



ления осажденной пленки были измерены с помощью эллипсометрии на длине волны 1550 нм и составили 730 нм и 2,01 соответственно;

- б) В процессе LPCVD использовался проточный реактор низкого давления и печь типа СДОМ. Пленка нитрида кремния была получена в результате следующей химической реакции силана и аммиака:



В процессе осаждения использовались следующие параметры технологического процесса: температура подложки - 850 °С; давление в реакторе - 45 Па; соотношение потоков SiH<sub>4</sub>/NH<sub>3</sub>-1/3. В результате была получена пленка нитрида кремния толщиной 712 нм. Для измерения толщины и показателя преломления выращенной пленки использовался метод эллипсометрии на длине волны 1550 нм. Выбранные технологические параметры обеспечивали такую же величину показателя преломления 2,01, что и в предыдущем случае.

На следующем этапе (см. рис. 1.III) на поверхность пленки нитрида кремния методом центрифугирования наносился слой позитивного фоторезиста S1813 G2 SP-15 толщиной 1,8 мкм. Фоторезист отверждался при температуре 90–110 °С. Далее проводилась контактная ультрафиолетовая литография (см. рис. 1.IV) на установке Suss MA6/BA6. Используемый для литографии фотоша-

At the next stage (see Fig. 1.III), a layer of positive photoresist S1813 G2 SP-15 with a thickness of 1.8 μm was deposited on the silicon nitride film surface by the centrifugation method. The photoresist was cured at a temperature of 90–110 °C. Then, the contact ultra-violet lithography was applied (see Fig. 1.IV) using a Suss MA6/BA6 unit. The mask work used for lithography consisted of ten strips with a width of 1 μm to 5 μm and a pitch of 0.5 μm. The photoresist development (see Fig. 1.V) was performed in a 0.6% KOH solution. After development, the photoresist was dried at a temperature of 90–110 °C.

The next stage was the reactive-ion etching of silicon nitride on a photoresist mask (see Fig. 1.VI). Etching was performed at a pressure of 5 Pa in a mixture of CF<sub>4</sub> and O<sub>2</sub>. The CF<sub>4</sub> flow was equal to 80 cm<sup>3</sup>/min and the O<sub>2</sub> flow was equal to 16 cm<sup>3</sup>/min. The plasma discharge power was 50 W. After etching, the masking photoresist was removed using SPR-01F (see Fig. 1.VII). As a result of the etching process, the silicon nitride strips were obtained. The waveguide morphology was verified using the atomic force microscopy. As a result, it was found that the waveguides obtained have the sufficiently steep and even walls. The wall steepness of the micro-waveguides was at least 70°. The widths of the waveguides at the base were greater than the width of the waveguides on the mask work by 340 ± 140 nm. The width values of the waveguides on the mask work will be used to describe the results obtained in this text.

At the final stage (see Fig. 1.VIII), a silicon oxide cladding layer was deposited on the substrate sur-



блон состоял из десяти полосок шириной от 1 мкм до 5 мкм с шагом 0,5 мкм. Проявление фоторезиста (см. рис. 1.V) проводилось в растворе КОН 0,6%. После проявления проводилась сушка фоторезиста при температуре 90–110 °С.

Следующим этапом являлось плазмохимическое травление нитрида кремния по маске из фоторезиста (см. рис. 1.VI). Травление проводилось при давлении 5 Па в смеси  $\text{CF}_4$  и  $\text{O}_2$ . Поток  $\text{CF}_4$  составлял 80  $\text{см}^3/\text{мин}$ , а поток  $\text{O}_2$  – 16  $\text{см}^3/\text{мин}$ . Мощность разряда плазмы составляла 50 Вт. После травления фоторезистивная маска удалялась с помощью СПР-01Ф (см. рис. 1.VII). В результате процесса травления были получены полоски нитрида кремния. Морфология волноводов проверялась с помощью атомно-силовой микроскопии. В результате было обнаружено, что полученные волноводы имеют достаточно крутые и ровные стенки. Крутизна стенок микроволноводов составляла не менее 70°. Ширины волноводов в основании на  $340 \pm 140$  нм превышали ширину волноводов на фотошаблоне. Далее в тексте именно значения ширин волноводов, заложенных на фотошаблоне, будут использоваться для описания полученных результатов.

На заключительном этапе (см. рис. 1.VIII) на поверхность пластины наносился покрывной слой оксида кремния. Процесс осаждения состоял из двух стадий. На первой стадии слой  $\text{SiO}_2$  толщиной 2 мкм наносился методом LPCVD при следующих параметрах: температура 250 °С, время 18 минут, давление 4,5 Па, поток силана и кислорода 266  $\text{см}^3/\text{мин}$  и 400  $\text{см}^3/\text{мин}$  соответственно. Это обеспечивало высокую конформность покрытия микроволноводов. По результатам эллипсометрии на 1550 нм показатель преломления этого слоя составлял 1,42. На второй стадии методом PECVD формировался внешний слой толщиной 1,13 мкм. В процессе плазмохимического осаждения оксида кремния использовались следующие параметры: температура 250 °С, мощность разряда 50 Вт, давление 4 Па, поток силана и кислорода 700  $\text{см}^3/\text{мин}$  и 50  $\text{см}^3/\text{мин}$  соответственно. По результатам эллипсометрии на 1550 нм показатель преломления этого слоя составлял 1,45.

Пластины с волноведущими структурами после изготовления были разделены пополам. Половина пластин подвергалась высокотемпературному отжигу при температуре 1100 °С в течение 90 минут в атмосфере  $\text{N}_2$ . Фрагмент массива изготовленных волноводов представлен на рис. 2(а).

Для проведения измерений вносимых потерь пластины с микроволноводами нарезались на прямоугольные чипы с площадью поверхности

face. The deposition process consisted of two stages. At the first stage, a  $\text{SiO}_2$  layer with the thickness of 2  $\mu\text{m}$  was deposited by the LPCVD method with the following parameters: temperature – 250 °С, time – 18 minutes, pressure – 4.5 Pa, silane and oxygen flows – 266  $\text{cm}^3/\text{min}$  and 400  $\text{cm}^3/\text{min}$ , respectively. This ensured high conformity of the micro-waveguide coating. According to the ellipsometry results at 1550 nm, the refractive index of this layer was equal to 1.42. At the second stage, an outer layer with the thickness of 1.13  $\mu\text{m}$  was grown by the PECVD method. During the plasma-enhanced chemical deposition of silicon oxide, the following parameters were used: temperature – 250 °С, discharge power – 50 W, pressure – 4 Pa, silane and oxygen flows – 700  $\text{cm}^3/\text{min}$  and 50  $\text{cm}^3/\text{min}$ , respectively. According to the ellipsometry results at 1550 nm, the refractive index of the cladding layer was equal to 1.45.

The substrates with the waveguide structures were split in half after the production process. Half of the substrates were subjected to the high-temperature annealing at a temperature of 1100 °С for 90 minutes in an  $\text{N}_2$  atmosphere. A fragment of the produced waveguide array is shown in Fig. 2(a).

To measure the insertion loss, the plates with micro-waveguides were cut into the rectangular chips with a surface area of  $5 \times 5$   $\text{mm}^2$ . In order to reduce the number of splits and scratches that occur when cutting the plate into chips, the samples were subsequently polished. Polishing was performed at an angle of 90 degrees using a KrellTech device.

### 3. STUDY OF A TRANSMISSION FACTOR OF THE STRAIGHT WAVEGUIDES MANUFACTURED USING THE LPCVD AND PECVD TECHNOLOGY

The measuring equipment consisted of a laser with a wavelength of 1.55  $\mu\text{m}$ , a polarization controller, input and output lensed fibers, differential translators, and a power meter. The input laser power applied to the fiber was 21.4 mW. The polarization controller was used to maintain the TE polarization of the input radiation, providing the minimal propagation losses. Each chip contained 4 identical series consisting of 9 micro-waveguides with a width of 1 to 5  $\mu\text{m}$ . The radiation was introduced and received using the lensed fibers with a focal length of 12  $\mu\text{m}$  and a focal spot size of 2  $\mu\text{m}$ .

Figure 2(b) demonstrates the averaged measurement results for 4 series of micro-waveguides produced using the LPCVD technology without any high-temperature annealing (red lines and symbols), LPCVD with annealing (black lines and symbols), PECVD

5×5 мм<sup>2</sup>. С целью уменьшения числа сколов и царапин, возникающих при резке пластины на чипы, производилась последующая полировка образцов. Полировка производилась под углом 90 градусов при помощи установки фирмы KrellTech.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ ПРЯМЫХ ВОЛНОВОДОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ LPCVD И PECVD

Измерительная установка состояла из лазера с длиной волны 1,55 мкм, контролера поляризации, вводного и выводного линзированных волокон, дифференциальных трансляторов, а также измерителя мощности. Мощность излучения на входе в волокно составляла 21,4 мВт. С помощью контролера поляризации поддерживалась ТЕ-поляризация входного излучения, обеспечивающая минимальные потери на распространение. Каждый чип содержал 4 одинаковые серии по 9 микроволноводов шириной от 1 до 5 мкм. Излучение вводилось и принималось с помощью линзированных волокон с фокусным расстоянием 12 мкм и размером фокусного пятна 2 мкм.

На рис. 2(b) представлены усредненные результаты измерений 4 серий микроволноводов, изготовленных по технологии LPCVD без высокотемпературного отжига (красные линии и значки), LPCVD с отжигом (черные линии и значки), PECVD без отжига (зеленые линии и значки), PECVD с отжигом (синие линии и значки). По результатам измерений можно сделать следующие выводы:

1. Волноведущие структуры, изготовленные по технологии LPCVD, демонстрируют достаточно высокие потери, уровень которых практически линейно уменьшается с увеличением ширины волноведущих структур. Высокотемпературный отжиг практически не влияет на уровень потерь. Одной из наиболее вероятных причин такого поведения является высокий уровень дефектов, образуемых в результате механических напряжений, генерируемых в процессе роста

without annealing (green lines and symbols), PECVD with annealing (blue lines and symbols). Based on the measurement results, the following conclusions can be drawn:

1. The waveguide structures made using the LPCVD technology demonstrate rather high losses, the level of which is decreased almost linearly with the increased width of the waveguide structures. The high-temperature annealing has almost no effect on the level of losses. One of the most probable reasons for such behavior is the high level of defects developed as a result of mechanical stresses generated during the silicon nitride film growth with a thickness of 712 μm. It is known that during the Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> growth using the LPCVD method, the tensile stresses occur that make it difficult to obtain the films with a thickness of more than 400 μm. To reduce stresses, the grooves can be made in the Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> film [22–24], and the two-stage deposition with intermediate high-temperature annealing at a temperature of 1200 °C for 3 hours in an argon atmosphere can also be used [15]. The multilayer deposition with periodical annealing and grooving relate to the additional processing stages that greatly slow down the production process and increase the production costs. As can be seen from the results presented in Fig. 2(b), the selected annealing mode did not provide the stress relaxation.

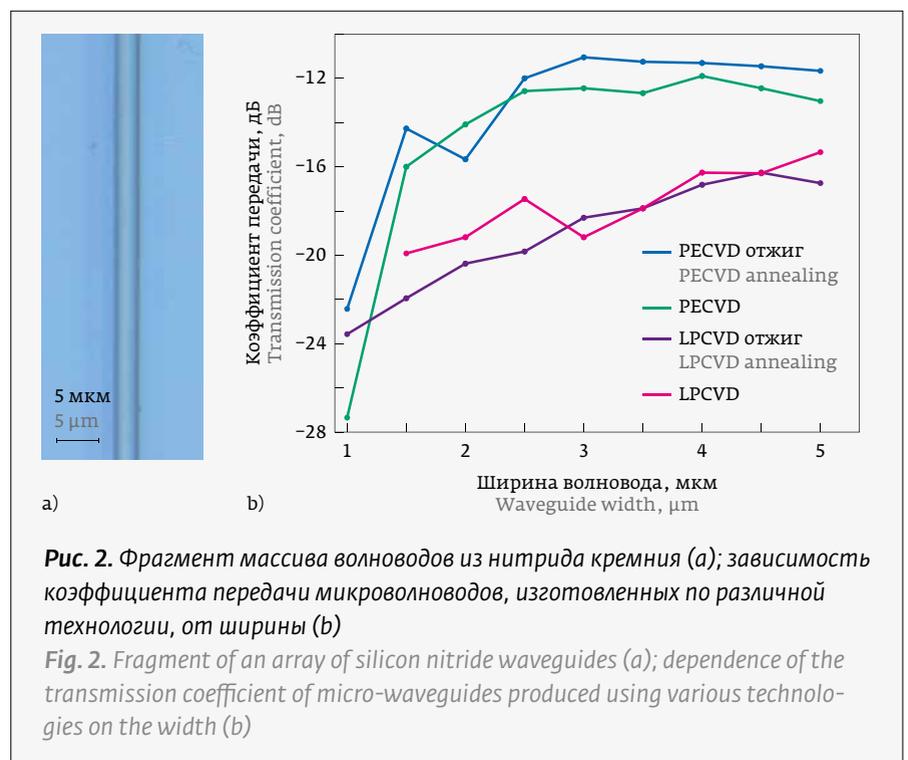


Рис. 2. Фрагмент массива волноводов из нитрида кремния (а); зависимость коэффициента передачи микроволноводов, изготовленных по различной технологии, от ширины (б)

Fig. 2. Fragment of an array of silicon nitride waveguides (a); dependence of the transmission coefficient of micro-waveguides produced using various technologies on the width (b)



пленки нитрида кремния толщиной 712 мкм. Известно, что в процессе роста  $\text{Si}_3\text{N}_4$  методом LPCVD возникают растягивающие напряжения, которые затрудняют получение пленок толщиной более 400 мкм. Для уменьшения напряжений в пленке  $\text{Si}_3\text{N}_4$  могут создаваться канавки [22–24], а также использоваться двух-этапное осаждение с промежуточным высокотемпературным отжигом при температуре 1200 °С в течение 3 часов в атмосфере аргона [15]. Многослойное осаждение с периодическим отжигом и создание канавок связано с дополнительными технологическими этапами, которые значительно замедляют процесс изготовления и повышают стоимость производства. Как видно из результатов, представленных на рис. 2(b), выбранный режим отжига не обеспечивал релаксацию напряжений.

2. Технология PECVD обеспечивала получение волноведущих структур со значительно меньшим уровнем вносимого затухания. Условно представленную зависимость можно разделить на два участка. На первом участке до 3 мкм потери быстро уменьшаются с ростом ширины волновода. Потери на этом участке связаны с использованием классической фотолитографии и могут быть уменьшены за счет отработки процессов фотолитографии и травления. На втором участке, начиная с ширины 3 мкм, потери слабо зависят от ширины волновода. Известно, что фактором, ограничивающим применение метода PECVD для изготовления ФИС на нитриде кремния, является значительно более высокий уровень потерь на распространение излучения. Причиной этого явления является поглощение на Si-H и N-H комплексах, оставшихся в процессе роста пленки [25]. Основным методом уменьшения вносимых потерь в этом случае является термический отжиг, который обеспечивает разрушение связей в Si-H, N-H комплексах и выведение свободного водорода из пленки [26, 27]. Как видно из рис. 2(b) отжиг структуры обеспечивает уменьшение потерь на 1 дБ, что наиболее вероятно связано с разложением Si-H и N-H комплексов и выделением свободного водорода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье произведено сравнение оптических свойств микроволноводов из нитрида кремния, изготовленных методами плазмохимического

2. The PECVD technology provided the waveguide structures with a significantly lower level of insertion attenuation. The provided dependence can be conditionally divided into two sections. In the first section up to 3  $\mu\text{m}$ , the losses are rapidly decreased with the increased waveguide width. The losses in this area are related to the use of classical photolithography and can be reduced by fine-tuning of the photolithography and etching processes. In the second section, beginning from a width of 3  $\mu\text{m}$ , the losses weakly depend on the waveguide width. It is known that the factor limiting the use of the PECVD method for the PIC production on silicon nitride is a significantly higher level of propagation losses. The reason for this phenomenon is the absorption on Si-H and N-H complexes remaining during the film growth process [25]. In this case, the main method for reducing insertion loss is thermal annealing that ensures the bond disruption in Si-H, N-H complexes and free hydrogen removal from the film [26, 27]. As can be seen from Fig. 2(b), the structure annealing provides a 1 dB loss reduction that is most likely due to the decomposition of the Si-H and N-H complexes and free hydrogen release.

## 4. CONCLUSION

The paper compares the optical properties of silicon nitride microwave guides produced by the plasma-enhanced chemical vapor deposition and chemical vapor deposition in the low-pressure flow reactors. Moreover, special attention is paid to the possible transfer of the results obtained to the mass production of photonic integrated circuits using the classical lithography. It is shown that the developed method of plasma-enhanced chemical deposition using photolithography provides the losses in structures with a cross section of  $0.7 \times 3 \mu\text{m}^2$  at a level of 12 dB, including the losses for the optical signal input and output. Moreover, the developed production methods for the waveguide structures can be used for mass production of the photonic integrated circuits. To further reduce insertion losses, it is necessary to study and refine the annealing methods, as well as to refine the photolithographic methods in order to improve the waveguide quality that will make it possible to reduce the waveguide width to a level of 1.5  $\mu\text{m}$ .

## ACKNOWLEDGEMENT

The work was performed as a part of the state task from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant No. FSEE-2020-0005).

осаждения из газовой фазы и химического осаждения из газовой фазы в реакторах проточного типа низкого давления. При этом особое внимание уделялось возможности переноса полученных результатов на массовое производство фотонных интегральных схем с использованием классической литографии. Показано, что разработанный метод плазмохимического осаждения с использованием фотолитографии обеспечивает потери в структурах сечением  $0,7 \times 3$  мкм<sup>2</sup> на уровне 12 дБ, включая потери на ввод и вывод оптического сигнала. При этом разработанные методы получения волноведущих структур могут быть использованы для массового производства фотонных интегральных схем. Для дальнейшего понижения вносимых потерь необходимо исследование и отработка методов отжига, а также отработка методов фотолитографии с целью повышения качества волноводов, что позволит уменьшить ширину волноводов до уровня 1,5 мкм.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FSEE-2020-0005).

### АВТОРЫ

- Никитин А. А., к. ф.- м. н., кафедра физической электроники и технологии, ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина), С-Пб, Россия.  
ORCID: 0000-0002-4226-4341
- Ершов А. А., аспирант, ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина), С-Пб, Россия.  
ORCID: 0000-0003-3600-4946
- Рябцев И. А., аспирант, ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина), С-Пб, Россия.  
ORCID 0000-0001-8158-8827
- Кондрашов А. В., к. ф.- м. н., кафедра физической электроники и технологии, ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина), С-Пб, Россия.  
ORCID: 0000-0002-7337-8907
- Семенов А. А., д. т. н., доцент, зав. кафедрой физической электроники и технологии, ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина), С-Пб, Россия.  
ORCID: 0000-0003-2348-3773
- Устинов А. Б., д. ф.- м. н., руководитель лаборатории магнетики и радиофотоники им. Б. А. Калиникова, профессор, кафедра физической электроники и технологии, ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина), С-Пб, Россия.  
ORCID: 0000-0002-7382-9210
- Воропаев К. О. начальник группы, отдел 1. разработка ИЭТ, АО «ОКБ-Планета», Великий Новгород, Россия.  
ORCID: 0000-0002-6159-8902
- Петров А. В., к. т. н., генеральный директор, АО «ОКБ-Планета», Великий Новгород, Россия.
- Парфенов М. В., м. н. с., лаб. квантовой электроники, ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, С-Пб, Россия.  
ORCID: 0000-0003-3867-9007
- Шамрай А. В., д. ф.- м. н., зав. лаб. квантовой электроники, ФТИ им. А. Ф. Иоффе, С-Пб, Россия.  
ORCID: 0000 0003 0292 8673
- Теруков Е. И., д. т. н., зав. лаб. физико-химических свойств полупроводников, ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, С-Пб, Россия.  
ORCID: 0000-0002-4818-4924

ООО «Лазерные компоненты» – один из старейших российских поставщиков комплектующих к оптоэлектронным, лазерным, навигационным и тепловизионным системам, а также надёжный партнёр в области поставки измерительного оборудования различного типа. Мы предлагаем:



**Лазеры:**

- Диодные лазеры с волоконным выходом;
- Лазеры на эрбиевом стекле;
- МOPA лазеры JPT
- Сверхбыстрые лазеры промышленного типа;
- DPSS лазеры CNI.



**Оптика на заказ:**

- Линзы и призмы для видимого и инфракрасного диапазонов;
- Крупногабаритная оптика и микрооптика;
- Активные элементы;
- Чистый кварц.





**Техника ИК и УФ диапазона:**

- Камеры SWIR, MWIR, LWIR, UV;
- ИК объективы;
- Приборы ночного видения;
- AMOLED и MicroLED микродисплеи;
- Измерительные тепловизоры



**Измерительное оборудование:**

- Анализаторы спектра;
- Генераторы сигналов;
- Анализаторы цепей.





**Навигационное оборудование:**

- Инклинометры;
- Инерциальные измерительные блоки;
- ГНСС приёмники;
- Волоконно-оптические и МЭМС гироскопы и акселерометры;
- Интегрированные навигационные системы.

Россия, г. Москва,  
Варшавское ш., д. 9 стр 1б  
+7 (495) 845-12-10  
expo@lasercomponents.ru  
www.lasercomponents.ru



## REFERENCES

1. **Capmany J., Novak D.** Microwave photonics combines two worlds. *Nature photonics*. 2007 Jun; 1(6): 319–330. DOI: 10.1038/nphoton.2007.89.
2. **Belkin M. E., Kudzh S. A., Sigov A. S.** Novye principy postroeniya radioelektronnoy apparatury SVCh-diapazona s ispol'zovaniem radiofotonnoy tekhnologii. *Rossiyskiy tekhnologicheskij zhurnal*. 2016; 4.1: 4–20. DOI:10.32362/2500-316X-2016-4-1-4-20.  
**Белкин М. Е., Кудж С. А., Сигов А. С.** Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиофотонной технологии. *Российский технологический журнал*. 2016; 4.1: 4–20. DOI: 10.32362/2500-316X-2016-4-1-4-20.
3. **Capmany J., Ortega B., Pastor D.** A tutorial on microwave photonic filters. *Journal of Lightwave Technology*. 2006 Jan; 24(1): 201–229. DOI: 10.1109/JLT.2005.860478.
4. **Kippenberg T. J., Gaeta A. L., Lipson M., Gorodetsky M. L.** Dissipative Kerr solitons in optical microresonators. *Science*. 2018 Aug; 361(6402): ean8083. DOI: 10.1126/science.aan8083.
5. **Marpaung D, Yao J, Capmany J.** Integrated microwave photonics. *Nature photonics*. 2019 Feb; 13(2): 80–90. DOI: 10.1038/s41566-018-0310-5.
6. **Newman Z. L. et al.** Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock. *Optica*. 2019 May; 6(5): 680–685. DOI: 10.1364/OPTICA.6.000680.
7. **Voloshin A. S. et al.** Dynamics of soliton self-injection locking in optical microresonators. *Nature communications*. 2021 Jan; 12(1):1–10. DOI: 10.1038/s41467-020-20196-y.
8. **Wang J, Long Y.** On-chip silicon photonic signaling and processing: a review. *Science Bulletin*. 2018 Oct; 63(19): 1267–1310. DOI: 10.1016/j.scib.2018.05.038.
9. **Nikitin A. A. et al.** Carrier-induced optical bistability in the silicon micro-ring resonators under continuous wave pumping. *Optics Communications*. 2021 Feb; 480:126456. DOI: 10.1016/j.optcom.2020.126456.
10. **Nikitin A. A. et al.** Optical bistable SOI micro-ring resonators for memory applications. *Optics Communications*. 2022 May; 511:127929. DOI: 10.1016/j.optcom.2022.127929.
11. **Smit M. et al.** An introduction to InP-based generic integration technology. *Semiconductor Science and Technology*. 2014 Jun; 29(8): 083001. DOI: 10.1088/0268-1242/29/8/083001.
12. **Blumenthal D. J. et al.** Silicon nitride in silicon photonics. *Proceedings of the IEEE*. 2018 Sep; 106(12): 2209–2231. DOI: 10.1109/JPROC.2018.2861576.
13. **Roeloffzen C. G. et al.** Low-loss Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> TriPlex optical waveguides: Technology and applications overview. *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*. 2018 Jan; 24(4): 1–21. DOI: 10.1109/JSTQE.2018.2793945.
14. **Wang L. et al.** Nonlinear silicon nitride waveguides based on a PECVD deposition platform. *Optics express*. 2018 Apr; 26(8): 9645–9654. DOI: 10.1364/OE.26.009645.
15. **Ji X. et al.** Methods to achieve ultra-high quality factor silicon nitride resonators. *APL Photonics*. 2021 Jul; 6(7): 071101. DOI: 10.1063/5.0057881.
16. **Moss D. J. et al.** New CMOS-compatible platforms based on silicon nitride and Hydex for nonlinear optics. *Nature photonics*. 2013 Aug; 7(8): 597–607. DOI: 10.1038/nphoton.2013.183.
17. **Pasquazi A et al.** Micro-combs: A novel generation of optical sources. *Physics Reports*. 2018 Jan; 729: 1–81. DOI: 10.1016/j.physrep.2017.08.004.
18. **Kippenberg T. J. et al.** Dissipative Kerr solitons in optical microresonators. *Science*. 2018 Aug; 361(6402): ean8083. DOI: 10.1126/science.aan8083.
19. **Gaeta A. L., Lipson M., Kippenberg T. J.** Photonic-chip-based frequency combs. *Nature photonics*. 2019 Mar; 13(3): 158–169. DOI: 10.1038/s41566-019-0358-x.
20. **Vasil'ev V. YU.** Tekhnologii polucheniya tonkih plenok nitrida kremniya dlya mikroelektroniki i mikrosistemnoy tekhniki. CHast' 1. Termicheski aktivirovannye processy v protochnyyh reaktorah. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2018; 20(5):287–296. DOI: 10.17587/nmst.20.287-296.  
**Васильев В. Ю.** Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 1. Термически активированные процессы в проточных реакторах. *Нано- и микросистемная техника*. 2018; 20(5):287–296. DOI: 10.17587/nmst.20.287-296.
21. **Vasil'ev V. YU.** Tekhnologii polucheniya tonkih plenok nitrida kremniya dlya mikroelektroniki i mikrosistemnoy tekhniki. CHast' 3. Plazmoaktivirovannye processy v protochnyyh reaktorah. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2018; 20(9):542–554. DOI: 10.17587/nmst.20.542-554.  
**Васильев В. Ю.** Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 3. Плазмоактивированные процессы в проточных реакторах. *Нано- и микросистемная техника*. 2018; 20(9):542–554. DOI: 10.17587/nmst.20.542-554.
22. **Luke K., Dutt A., Poitras C. B., Lipson M.** Overcoming Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> film stress limitations for high quality factor ring resonators. *Optics express*. 2013 Sep; 21(19): 22829–33. DOI:10.1364/OE.21.022829.
23. **Xuan Y. et al.** High-Q silicon nitride microresonators exhibiting low-power frequency comb initiation. *Optica*. 2016 Nov; 3(11): 1171–80. DOI: 10.1364/OPTICA.3.001171.
24. **Pfeiffer M. H., Kordts A., Brasch V., Zervas M., Geiselmann M., Jost J. D., Kippenberg T. J.** Photonic Damascene process for integrated high-Q microresonator based nonlinear photonics. *Optica*. 2016 Jan; 3(1): 20–5. DOI: 10.1364/OPTICA.3.000020.
25. **Ay F., Aydinli A.** Comparative investigation of hydrogen bonding in silicon based PECVD grown dielectrics for optical waveguides. *Optical materials*. 2004 Jun; 26(1): 33–46. DOI: 10.1016/j.optmat.2003.12.004.
26. **Shaw M. J., Guo J., Vawter G. A., Habermehl S., Sullivan C. T.** Fabrication techniques for low-loss silicon nitride waveguides. *Proceedings of SPIE. Micromachining Technology for Micro-Optics and Nano-Optics III*. 2005; Jan; 5720:109–118. DOI: 10.1117/12.588828.
27. **Vasil'ev V. YU.** Tekhnologii polucheniya tonkih plenok nitrida kremniya dlya mikroelektroniki i mikrosistemnoy tekhniki. CH. 8. Vliyaniye vodoroda v plenках na ih svoystva. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2019; 21(6):352–367.  
**Васильев В. Ю.** Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Ч. 8. Влияние водорода в пленках на их свойства. *Нано- и микросистемная техника*. 2019; 21(6):352–367.

## ABOUT AUTHORS

Nikitin A. A., Cand. of Sc. (Phys. & Math), Depart. of Physical Electronics and Technology, LETI, St. Petersburg, Russia.

ORCID: 0000-0002-4226-4341

Ershov A. A., post-graduate student, LETI by V. I. Ulyanova (Lenina), St. Petersburg, Russia.

ORCID: 0000-0003-3600-4946

Ryabtsev I. A., postgraduate student, LETI by V. I. Ulyanova (Lenina), St. Petersburg, Russia.

ORCID 0000-0001-8158-8827

Kondrashov A. V., Candidate of Physical-Mathematical Sciences, Department of Physical Electronics and Technology, LETI by V. I. Ulyanova (Lenina), St. Petersburg, Russia.

ORCID: 0000-0002-7337-8907

Semenov A. A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head Department of Physical Electronics and technologies, LETI by V. I. Ulyanova (Lenina), St. Petersburg, Russia.

ORCID: 0000-0003-2348-3773

Ustinov A. B., Doc. of Sc. (Phys. & Math.), Prof., Head by B. A. Kalinikosa Lab. of magn. & radiophotonics, Depart. of Phys. Electronics and Technology, LETI. V. I. Ulyanova (Lenina), St. Petersburg, Russia.

ORCID: 0000-0002-7382-9210

Voropaev K. O. Head of the group, Depart. 1. development of IET, JSC "OKB-Planeta", Veliky Novgorod, Russia.

ORCID: 0000-0002-6159-8902

Petrov A. V., Cand. of Sc. (Eng.), General Director, OKB-Planeta JSC, Veliky Novgorod, Russia.

Parfenov M. V., junior researcher, lab. quantum electronics, Ioffe PTI of the RAS, St. Petersburg, Russia.

ORCID: 0000-0003-3867-9007

Shamrai A. V. lab. quantum electronics, Ioffe PTI of the RAS, St. Petersburg, Russia.

ORCID: 0000-0003-0292\_8673

Terukov E. I., Doctor of Technical Sciences, Head lab. physical and chemical, properties of semiconductors, Ioffe PTI of the RAS, St. Petersburg, Russia.

ORCID: 0000-0002-4818-4924



**HOLOEXPO 2022**  
science & practice

**XIX Международная конференция  
по голографии и прикладным  
оптическим технологиям**

**20-22 сентября 2022 г.  
Санкт-Петербург, Россия**



### **Зачем участвовать**

- Презентовать свои исследования
- Узнать о новых разработках коллег
- Представить свои технологии в демозоне
- Найти партнеров из индустрии и научного сообщества

### **Что в программе**

- Научные секции
- Тематические семинары
- Демозона технологий и оборудования
- Нетворкинг и неформальные мероприятия с коллегами

### **Для кого**

- Институты и университеты
- Научно-исследовательские институты
- Научные группы и лаборатории промышленных предприятий
- Стартапы в области оптики и голографии
- Производители и поставщики компонентов, оборудования и материалов

**150 участников  
от науки и бизнеса**

**ВНИМАНИЕ! СРОК ПОДАЧИ ТЕЗИСОВ  
ДОКЛАДОВ ПРОДЛЕН ДО 10 ИЮЛЯ.  
Зарегистрироваться и узнать подробности**



[holoexpo.ru](http://holoexpo.ru)