

Влияние отжига на волноведущие свойства планарных волноводов, изготовленных на основе пленок из нитрида кремния различной толщины

А. А. Ершов^{✉1}, К. Н. Чекмезов¹, А. П. Буровихин¹, А. А. Никитин¹, С. Н. Аболмасов^{2,3},
А. А. Сташкевич⁴, Е. И. Теруков^{1,2,3}, А. В. Еськов¹, А. А. Семенов¹, А. Б. Устинов¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
"ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

²ООО "НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике", Санкт-Петербург, Россия

³Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия

⁴Университет Сорбонна Париж Север, Вилльтанёз, Франция

✉ aaershov@etu.ru

Аннотация

Введение. Нитрид кремния является многообещающим материалом для изготовления фотонных интегральных схем (ФИС). Одним из наиболее перспективных методов с точки зрения промышленного производства ФИС из нитрида кремния является метод плазмохимического осаждения из газовой фазы. Недостатком этого метода, ограничивающим его применение, является высокое затухание в телекоммуникационном диапазоне частот, обусловленное поглощением на Si–H- и N–H-комплексах, оставшихся в процессе роста пленки. Термический отжиг является основным способом разрушения этих комплексов и уменьшения потерь. Таким образом, актуальной задачей является изучение влияния отжига на волноведущие свойства фотонных интегральных волноводов из нитрида кремния.

Цель работы. Исследование влияния отжига на волноведущие свойства ФИС на основе пленок из нитрида кремния разной толщины, полученных методом плазмохимического осаждения из газовой фазы.

Материалы и методы. В работе исследовано влияние отжига на волноведущие свойства ФИС, изготовленных из пленок нитрида кремния толщиной 200, 400 и 700 нм. Для этого при помощи оптического анализатора компонентов высокого разрешения измерялись передаточные характеристики набора тестовых элементов. Измерения выполнены в диапазоне частот 185...196 ТГц.

Результаты. Из измеренных передаточных характеристик тестовых элементов были получены частотные зависимости декремента затухания, коэффициента связи и группового показателя преломления до и после отжига. Показано, что волноводы на пленках 200 нм демонстрировали достаточно высокое затухание по сравнению с волноводами на более толстых пленках, затухание в которых составляло 5 дБ в диапазоне 185...190 ТГц. На частотах выше 190 ТГц наблюдалось резкое возрастание потерь, связанных с поглощением на N–H-комплексах. В результате отжига потери уменьшаются во всей полосе частот. Адекватность определения волноведущих свойств продемонстрирована путем сопоставления теоретических и экспериментальных передаточных характеристик кольцевых резонаторов.

Заключение. Результаты исследования показывают, что для микроволноводов из нитрида кремния, полученных методом плазмохимического осаждения из газовой фазы, необходим отжиг. Отжиг при температуре 600 °С в течение 30 мин в вакууме позволил уменьшить затухание в микроволноводах сечением 900 × 400 и 900 × 700 нм² до 4 дБ/см во всем диапазоне частот от 185 до 196 ТГц.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы, оптические волноводы, нитрид кремния, отжиг

Для цитирования: Влияние отжига на волноведущие свойства планарных волноводов, изготовленных на основе пленок из нитрида кремния различной толщины / А. А. Ершов, К. Н. Чекмезов, А. П. Буровихин, А. А. Никитин, С. Н. Аболмасов, А. А. Сташкевич, Е. И. Теруков, А. В. Еськов, А. А. Семенов, А. Б. Устинов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 2. С. 119–131. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-2-119-131

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения Государственного задания № 075-01438-22-07 и гранта № FSEE-2022-0017.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 26.01.2024; принята к публикации после рецензирования 04.03.2024; опубликована онлайн 29.04.2024



Effect of Annealing Treatment on the Optical Properties of Silicon Nitride Waveguides

Alexander A. Ershov^{✉1}, Kirill N. Chekmezov¹, Anton P. Burovikhin¹, Andrey A. Nikitin¹,
Sergey N. Abolmasov^{2,3}, Andrey A. Stashkevich⁴, Evgeniy I. Terukov^{1,2,3},
Andrey V. Eskov¹, Alexander A. Semenov¹, Alexey B. Ustinov¹

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

²Scientific and Technical Center of Thin Film Technologies
in Energy LLC, St Petersburg, Russia

³Ioffe Institute, St Petersburg, Russia

⁴Université Sorbonne Paris Nord, Villetaneuse, France

✉ aaershov@etu.ru

Abstract

Introduction. Silicon nitride is a highly promising material for fabrication of photonic integrated circuits (PICs). Plasma-enhanced chemical vapor deposition is a prospective method for large-scale industrial production of silicon nitride-based PICs. The disadvantage of this method, which limits its practical application, consists in high insertion losses in the telecommunication frequency band due to absorption on the Si–H and N–H bonds remaining from the film growth process. Thermal annealing is the most common method for breaking these bonds and reducing losses. Therefore, investigation of the impact of annealing on the optical properties of photonic integrated waveguides is an important research task.

Aim. To investigate the effect of annealing treatment on the optical properties of PICs based on the silicon nitride films with different thicknesses obtained by plasma-enhanced chemical vapor deposition.

Materials and methods. The work investigates the effect of annealing treatment on the optical properties of PICs based on the silicon nitride films with thicknesses of 200, 400 and 700 nm. To that end, the transmission characteristics of a set of test elements were measured using a high-definition component analyzer in the frequency range of 185...196 THz.

Results. Frequency dependencies of loss and coupling coefficients, as well as the group index before and after annealing were extracted from the measured transmission characteristics of the test elements. It was found that waveguides on a 200-nm-thick film exhibited higher losses in comparison with the waveguides on thicker films. The waveguides with cross sections of 900×400 and 900×700 nm² demonstrate the losses below 5 dB in the frequency range of 185...190 THz. A rapid increase in losses due to absorption on the N–H bonds was observed at the frequencies above 190 THz. The work shows that thermal annealing reduces insertion losses across the frequency range from 185 to 196 THz. The adequacy of extracted optical parameters is confirmed by comparing theoretical and experimental transmission characteristics of the ring resonator.

Conclusion. The obtained results demonstrate that silicon nitride waveguides fabricated by the method of plasma-enhanced chemical vapor deposition require the stage of thermal annealing. Vacuum annealing at 600 °C for 30 min reduces insertion losses in the waveguides with cross sections of 900×400 and 900×700 nm² down to 4 dB/cm in the frequency band from 185 to 196 THz.

Keywords: photonic integrated circuits, optical waveguides, silicon nitride, annealing

For citation: Ershov A. A., Chekmezov K. N., Burovikhin A. P., Nikitin A. A., Abolmasov S. N., Stashkevich A. A., Terukov E. I., Eskov A. V., Semenov A. A., Ustinov A. B. Effect of Annealing Treatment on the Optical Properties of Silicon Nitride Waveguides. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 2, pp. 119–131. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-2-119-131

Source of funding. The work was carried out with the support of Ministry of Education and Science of Russian Federation (project no. 075-01438-22-07, grant FSEE-2022-0017).

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 26.01.2024; accepted 04.03.2024; published online 29.04.2024

Введение. В настоящее время нитрид кремния является одним из наиболее перспективных материалов для изготовления пассивных фотонных интегральных схем (ФИС). В основе интере-

са к данному материалу лежат рекордно низкие потери на распространение; отсутствие двухфотонного поглощения в телекоммуникационном диапазоне оптических частот; сильная керровская нелинейность; высокое значение показателя преломления; высокая радиационная стойкость и, наконец, потенциальная совместимость с КМОП-технологией создания электронных интегральных схем, что необходимо для уменьшения стоимости производства за счет использования уже существующих производственных мощностей [1–7]. Такие преимущества позволяют создавать как линейные [8], так и нелинейные [9] устройства в интегральном исполнении, которые находят применение не только в оптике, но и в радиофотонике [10, 11].

Широкое распространение получили два метода изготовления пленок нитрида кремния. Первый метод – химическое осаждение из газовой фазы при низком давлении в реакторах проточного типа (Low Pressure Chemical Vapor Deposition – LPCVD) [12]. Ограничивающими факторами этого метода являются необходимость использования высокой температуры подложки (450...1000 °C), а также механические напряжения, возникающие в процессе роста. Это приводит к технологическому ограничению толщины слоев, термической деформации подложек, невозможности изготовления на одной пластине в едином технологическом процессе как пассивных, так и активных оптических элементов. В связи с этим большое внимание в последнее время получили технологии, реализующие низкотемпературные процессы плазмохимического осаждения из газовой фазы (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition – PECVD). Технология PECVD является более доступным и дешевым методом осаждения пленок нитрида кремния (SiN_x), обеспечивающим переход к промышленной технологии массового производства ФИС. Преимуществами этой технологии являются отсутствие внутренних напряжений при изготовлении пленок большой толщины, а также значительно более высокие скорости осаждения (25...350 нм/мин) при меньших температурах около 25...350 °C [13]. Недостатком, ограничивающим применение PECVD для изготовления ФИС на нитриде кремния, является поглощение на Si–H- и N–H-комплексах, оставшихся в процессе роста, а также рассеяние на других химических примесях или дефектах, таких как микротрещины или микропустоты [14]. Основным методом уменьше-

ния вносимых потерь в этом случае является термический отжиг, который обеспечивает разрушение связей в таких комплексах и выведение свободного водорода из пленки [15, 16].

Для исследования влияния отжига на свойства волноведущих структур целесообразно использовать методы неразрушающего контроля оптических параметров. Для этого был использован метод, предложенный в [17]. В соответствии с этим методом на пластине изготавливаются наборы тестовых элементов, параметры которых исследуются до и после температурного отжига. Отметим, что основными механизмами потерь в оптических волноводах являются рассеяние на шероховатостях стенок волноводов и собственные потери в материале, из которого эти волноводы изготовлены [1]. Физически ясно, что доля мощности волны основной моды, заключенная в микроволноводе, возрастает с увеличением площади его сечения. Поэтому в волноводах на тонких пленках SiN_x доминирующим является рассеяние на шероховатостях стенок, тогда как в волноводах на толстых пленках наибольший вклад вносят потери в материале. Таким образом, в данной статье исследовано влияние отжига на параметры волноводов, изготовленных из пленок SiN_x разной толщины.

Описание образцов фотонных интегральных схем, изготовленных из пленок нитрида кремния. Для изготовления волноведущих структур использовались кремниевые подложки с подслоем оксида кремния толщиной 2 мкм. Оксид кремния выращивался методом термического окисления во влажном кислороде. Далее на поверхности подложек методом плазмохимического осаждения в установке Plasmalab System100 выращивались пленки SiN_x толщиной 200, 400 и 700 нм. Управление толщиной пленок осуществлялось с помощью изменения продолжительности процесса осаждения. Для создания набора тестовых структур использовались электронная литография и плазмохимическое травление. Шаблон набора тестовых элементов представлен на рис. 1. В состав тестового набора входили: прямые волноводы различной длины для определения эффективности ввода (рис. 1, а); волноводные ответвители (рис. 1, б), состоящие из прямого волновода и полукольца и используемые для определения коэффициента связи; кольцевые резонаторы радиусом 1 мм (рис. 1, в), используемые для исследования декремента затухания и груп-

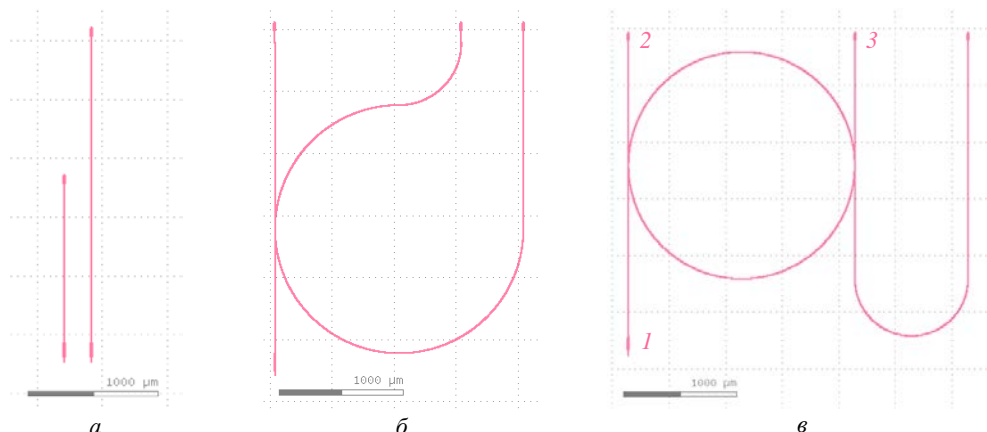


Рис. 1. Шаблон тестовых элементов: а – прямые волноводы; б – волноводный ответвитель; в – кольцевой резонатор
Fig. 1. Topology of the test elements: а – straight waveguide; б – directional coupler; в – ring resonator

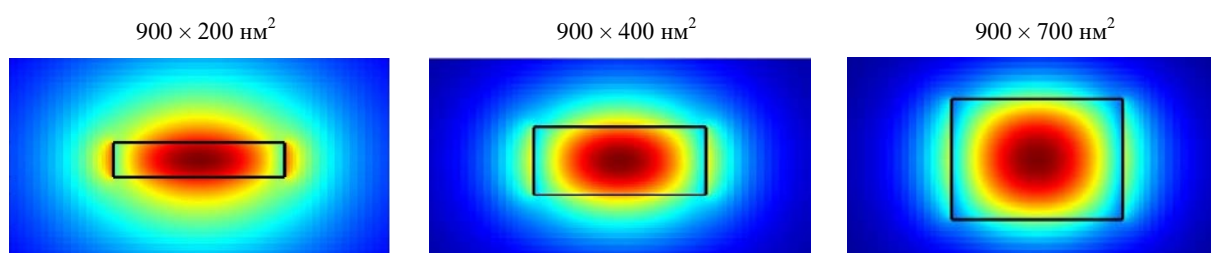


Рис. 2. Распределения основной компоненты поля E_x моды TE_{11} в волноводах различного сечения на частоте 185 ТГц

Fig. 2. The distributions of the E_x component of the TE_{11} mode at 185 THz

пового показателя преломления. На рис. 1, в цифрами 1, 2, 3, 4 показаны вход и выходы кольцевого резонатора соответственно. Расстояние между кольцом и подводящими волноводами, как и в случае направленного ответвителя, составляло 500 нм. На заключительном этапе плазмохимическим методом осаждался покрывной слой оксида кремния толщиной 2 мкм.

Для обеспечения квазиодномодового режима распространения волн и предотвращения паразитной связи с кремниевой подложкой ширина волноводов составляла 900 нм. Распределения основной компоненты поля E_x моды TE_{11} на частоте 185 ТГц (которая соответствует длине волны $\lambda = 1620.5$ нм) в волноводах сечениями 900×200 , 900×400 и 900×700 нм² представлены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, в микроволноводе сечением 900×700 нм² поле сосредоточено в волноводе. Эффективная площадь моды в таком волноводе составляет 0.85 мкм². В этом случае влияние шероховатостей стенок на волновой процесс в волноводах мало, поэтому затухание в них обусловлено потерями в материале волновода. Физически ясно, что с уменьшением толщины волновода площадь моды возрастает (для волновода сечением 900×200 нм² эффективная площадь

моды составляет 1.66 мкм²). В результате увеличивается влияние шероховатостей стенок волновода. Таким образом, волноводы на толстых пленках могут быть использованы для исследования технологии осаждения SiN_x и процессов отжига, а волноводы на тонких пленках – для исследования технологий литографии, травления и осаждения покрывного оксида. Отметим, что при выборе толщин волноводов учитывались следующие факторы. С одной стороны, увеличение толщины более 700 нм приводит к усилению влияния мод более высокого порядка. С другой стороны, при уменьшении толщины менее 200 нм значительно возрастают потери, связанные с паразитным переизлучением сигнала в кремниевую подложку.

Экспериментальное исследование тестовых элементов. Экспериментальное исследование передаточных характеристик тестовых элементов проводилось при помощи оптического анализатора компонентов высокого разрешения со встроенным перестраиваемым лазером, обеспечивающим автоматическое проведение измерений в диапазоне частот 185...196 ТГц (что соответствует диапазону длин волн 1529.6...1620.5 нм). Ввод и вывод излучения осуществлялся при помощи линзованных волокон (рис. 3), закреплен-

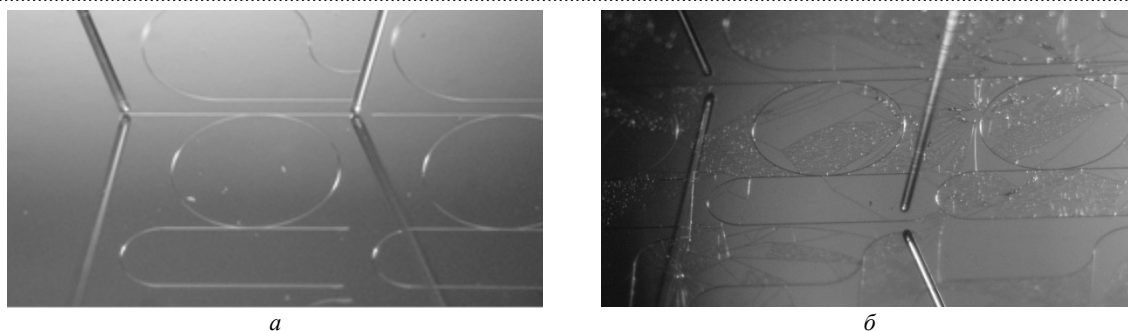


Рис. 3. Фотографии набора тестовых элементов на пленке нитрида кремния толщиной 700 нм и линзованных волокон для ввода/вывода излучения: *а* – до отжига; *б* – после отжига

Fig. 3. Photographs of the test elements on a 700-nm-thick silicon nitride film and lensed fibers: *a* – before annealing; *b* – after annealing

ных в линейные трансляторы, и брэгговских преобразователей. Излучение из анализатора вводилось в кольцевой резонатор через вход 1 (см. рис. 1, *б*). Сигнал с выхода 2 или 4 поступал на приемное волокно и регистрировался анализатором, обеспечивающим измерение передаточных характеристик. Далее в тексте статьи передаточная характеристика со входа 1 на выход 2 обозначена T_{21} , а со входа 1 на выход 4 обозначена T_{41} . Передаточные характеристики тестовых элементов измерялись до и после отжига. Отжиг проводился при температуре 600 °С в течение 30 мин в вакууме. После отжига на поверхности образцов наблюдалась сетка трещин в покрывном слое оксида кремния. На образцах с толщиной SiN_x 200 и 400 нм число трещин составляло 1...2 на квадратный сантиметр. Как показано на рис. 3, *б*, количество трещин на пластине с волноводами толщиной 700 нм значительно превышало это число. Отметим, что наличие трещин не вызывало изменений волноведущих свойств исследуемых ФИС.

На рис. 4 представлены фрагменты передаточных характеристик вблизи частоты 192 ТГц ($\lambda = 1561.4$ нм), полученные для кольцевых резонаторов радиусом 1 мм, изготовленных на основе пленок SiN_x различной толщины. На этом рисунке экспериментальные характеристики T_{21} и T_{41} показаны треугольниками и квадратами соответственно. Сплошными линиями на рис. 4 представлены результаты численного моделирования, которые будут обсуждаться далее. Как видно из рисунка, передаточные характеристики демонстрируют слабовыраженные резонансные свойства, что, как будет показано далее, обусловлено высокими значениями коэффициентов связи. Отметим, что после отжига на передаточных

характеристиках резонаторов, изготовленных на основе волноводов толщиной 200 нм, не было обнаружено резонансов, связанных с длиной кольца (правая панель на рис. 4, *а*). В связи с этим определение параметров микроволноводов толщиной 200 нм после отжига, а также численное моделирование передаточных характеристик кольцевых резонаторов не проводилось.

Исследование влияния отжига на оптические параметры ФИС. При помощи метода, подробно изложенного в [17], были получены значения коэффициентов затухания α и связи k , а также группового показателя преломления n_g . Полученные в результате частотные зависимости параметров показаны на рис. 5–7 черными треугольниками (до отжига) и красными квадратами (после отжига).

Как видно из рис. 5, волноводы сечением $900 \times 200 \text{ нм}^2$ демонстрируют более высокое затухание по сравнению с волноводами других сечений. Это свидетельствует о сильном рассеянии волны на шероховатостях стенок и неоднородностях в окружающем оксиде, что обусловлено несовершенством технологий литографии, травления и осаждения покрывного оксида. Волноводы большего сечения демонстрируют затухание 4...5 дБ/см в полосе 185...190 ТГц (рис. 5, *б*, *в*). Такое значение потерь соответствует данным, известным из литературы для волноводов на неотожженных пленках SiN_x , осажденных плазмохимическими методами [13]. Как видно из рис. 5, *б*, *в*, начиная с частоты 190 ТГц, потери в неотожженных волноводах резко возрастают. Такое поведение связано с поглощением излучения на второй гармонике колебаний в N–H-комплексных [13, 14]. В результате отжига потери уменьшаются, а их частотная зависимость становится близкой к линейной. Это свидетельствует о разрушении N–H-комплексов.

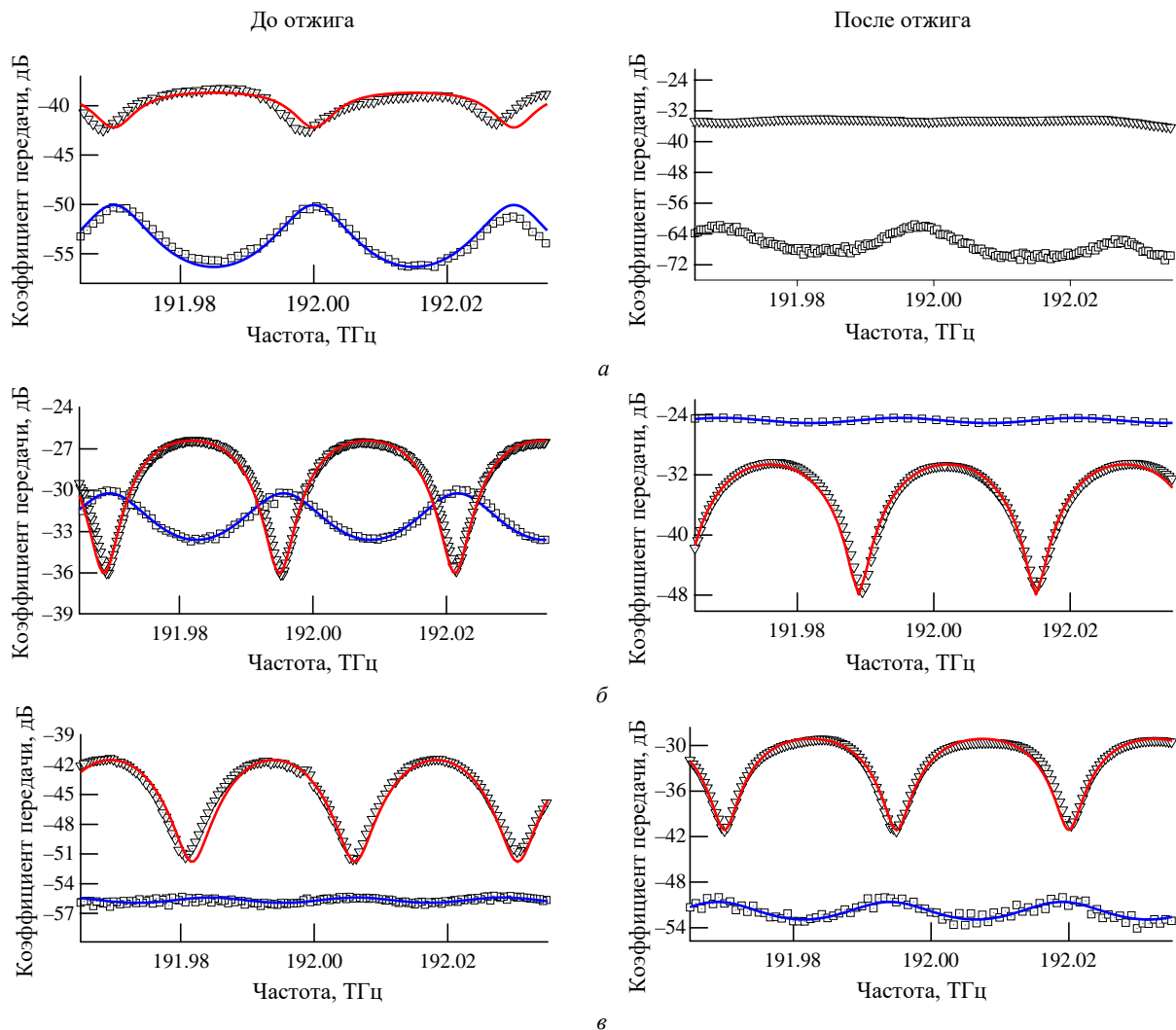


Рис. 4. Коэффициенты передачи кольцевых резонаторов на волноводах различных сечений: а – $900 \times 200 \text{ nm}^2$; б – $900 \times 400 \text{ nm}^2$; в – $900 \times 700 \text{ nm}^2$. Сплошными линиями показаны результаты моделирования, символами – экспериментальные данные T_{21} (треугольники) и T_{41} (квадраты)

Fig. 4. Transmission coefficients of the ring resonator on waveguides with various cross sections: а – $900 \times 200 \text{ nm}^2$; б – $900 \times 400 \text{ nm}^2$; в – $900 \times 700 \text{ nm}^2$. Solid lines show simulation results, symbols show experimental data T_{21} (triangles) and T_{41} (squares)

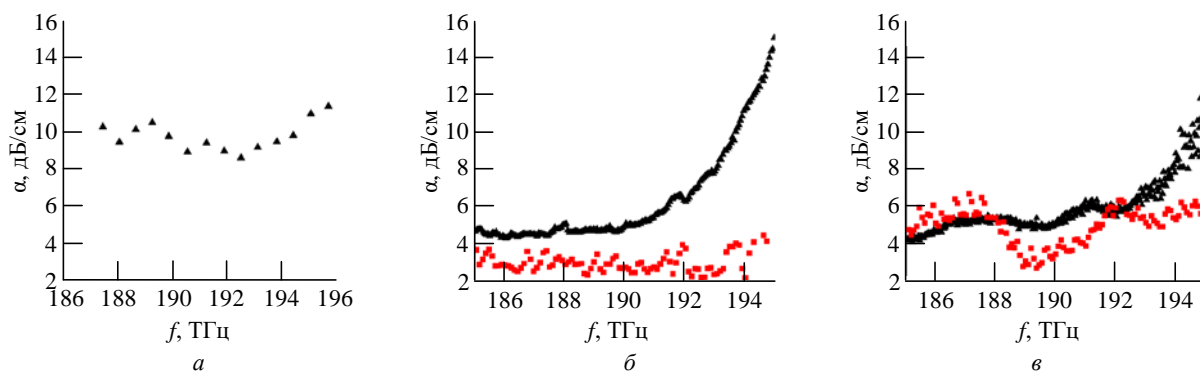


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента затухания α до отжига (черные треугольники) и после отжига (красные квадраты) для волноводов: а – $900 \times 200 \text{ nm}^2$; б – $900 \times 400 \text{ nm}^2$; в – $900 \times 700 \text{ nm}^2$

Fig. 5. Loss coefficient α versus frequency before annealing (black triangles) and after annealing (red squares) for waveguides: а – $900 \times 200 \text{ nm}^2$; б – $900 \times 400 \text{ nm}^2$; в – $900 \times 700 \text{ nm}^2$

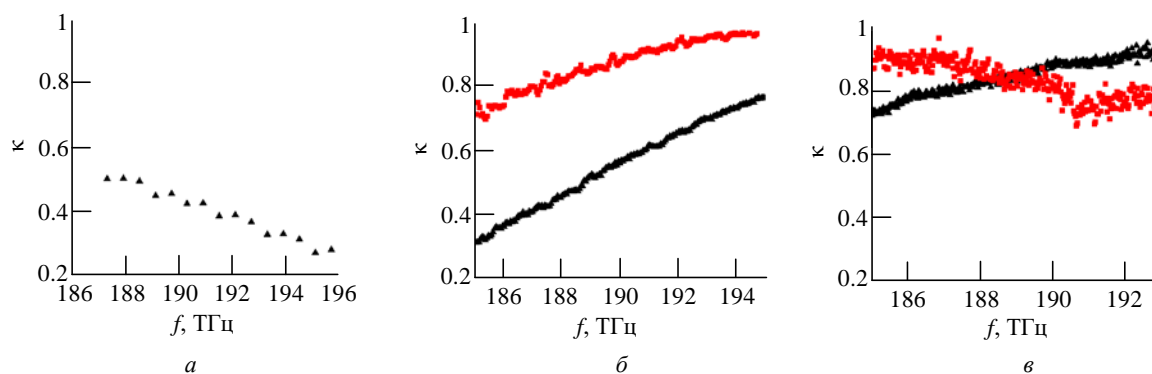


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициента связи κ до отжига (черные треугольники) и после отжига (красные квадраты) для волноводов: $a - 900 \times 200 \text{ nm}^2$; $б - 900 \times 400 \text{ nm}^2$; $в - 900 \times 700 \text{ nm}^2$

Fig. 6. Couple coefficient κ versus frequency before annealing (black triangles) and after annealing (red squares) for waveguides: $a - 900 \times 200 \text{ nm}^2$; $б - 900 \times 400 \text{ nm}^2$; $в - 900 \times 700 \text{ nm}^2$

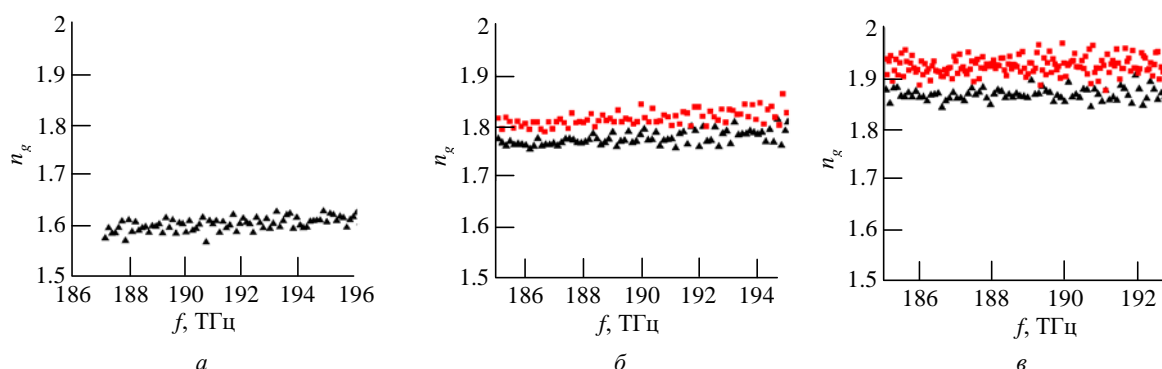


Рис. 7. Частотные зависимости группового показателя преломления n_g до отжига (черные треугольники) и после отжига (красные квадраты) для волноводов: $a - 900 \times 200 \text{ nm}^2$; $б - 900 \times 400 \text{ nm}^2$; $в - 900 \times 700 \text{ nm}^2$

Fig. 7. Group index n_g versus frequency before annealing (black triangles) and after annealing (red squares) for waveguides: $a - 900 \times 200 \text{ nm}^2$; $б - 900 \times 400 \text{ nm}^2$; $в - 900 \times 700 \text{ nm}^2$

На рис. 6 показаны частотные зависимости коэффициента связи. Видно, что кольцевые резонаторы демонстрируют разнонаправленное изменение коэффициента связи с частотой. Это обусловлено размерами резонаторов, в которых область связи составляет много длин волн и значительно превышает длину переизлучения. В результате даже слабое изменение дисперсионных свойств из-за изменения толщины волновода или отжига структуры существенно влияет на коэффициент связи. Отметим, что все структуры оказались сильно связаны с подводящими волноводами.

На рис. 7 показаны частотные зависимости группового показателя преломления n_g волноводов разной толщины. Видно, что n_g возрастает с увеличением толщины нитрида кремния. Следует отметить, что полученные значения групповых показателей преломления волноводов до отжига были меньше теоретических значений. Так, например, значения n_g , рассчитанные на частоте

193 ТГц ($\lambda = 1553.3 \text{ nm}$) для волноводов с поперечными сечениями 900×200 , 900×400 и $900 \times 700 \text{ nm}^2$, составляют 1.695, 1.983 и 2.083 соответственно. Из результатов видно, после отжига экспериментальные значения приближаются к теоретическим, что свидетельствует о возрастании концентрации кремния.

Для проверки полученных оптических параметров было проведено аналитическое моделирование передаточных характеристик кольцевых резонаторов по формулам, приведенным в [18, 19]. В расчете использованы полученные ранее частотные зависимости α , κ и n_g . На рис. 4 красными и синими сплошными линиями показаны результаты численного моделирования коэффициентов передачи T_{21} и T_{41} соответственно. Видно, что результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, что подтверждает адекватность найденных параметров волноводящих структур.

Для определения геометрии исследуемых структур в области связи были проведены дополнительные исследования. Для этого структуры были сколоты в области связи, а плоскость скола исследовалась при помощи растровой электронной микроскопии. В результате в зазоре между волноводами были обнаружены полости, которые могут приводить к значительному изменению коэффициента связи. Термический оксид является диффузионным барьером, приводя к тому, что атомарный водород может накапливаться на границе раздела: термический SiO_2 – PECVD SiN_x . Поэтому одной из причин формирования таких полостей является отжиг, в процессе которого атомарный водород начинает выходить из волновода вдоль поверхности термического оксида, приводя, таким образом, к дополнительному механическому напряжению в точке соприкосновения 3 материалов. Однако это требует проведения дополнительных исследований. Кроме того, технология осаждения покрывного слоя требует дальнейшей отработки. Среди способов решения данной проблемы можно выделить: проведение высокотемпературного отжига волноводных структур непосредственно после их формирования на поверхности термического оксида, т. е. до стадии осаждения покрывного оксида; снижение концентрации атомарного водорода непосредственно в процессе роста нитрида кремния.

Закключение. Из проведенного исследования следует, что в диапазоне частот оптического излучения 185...190 ТГц (1577.9...1620.5 нм) волноводы сечением 900×400 и $900 \times 700 \text{ нм}^2$ демонстрируют затухание 4...5 дБ/см. На частотах выше 190 ТГц потери быстро возрастают и достигают 12 дБ/см. Причиной такого возрастания является поглощение излучения на второй гармонике колебаний в N–H-комплексах. Для уменьшения такого поглощения необходимо разрушение этих комплексов путем отжига. В статье показано, что в результате отжига при температуре 600 °C в течение 30 мин в вакууме потери в волноводах сечением 900×400 и $900 \times 700 \text{ нм}^2$ уменьшились во всем диапазоне частот 185...196 ТГц (от 1529.6...1620.5 нм) и составили около 4 дБ/см. Эксперименты также продемонстрировали, что кольцевые резонаторы были сильно связаны с подводящими волноводами. Измерение геометрии структур в области связи с помощью растрового электронного микроскопа показало наличие в оксиде кремния полостей, расположенных между волноводами из нитрида кремния. Полученные в результате частотные зависимости α , κ и n_g использованы для моделирования передаточных характеристик кольцевых резонаторов. Из сопоставления экспериментальных и теоретических характеристик сделан вывод об адекватности полученных результатов.

Авторский вклад

Ершов Александр Александрович – подготовка текста статьи; измерение передаточных характеристик тестовых элементов.

Чекмезов Кирилл Николаевич – подготовка программы и численное моделирование передаточных характеристик кольцевых резонаторов.

Буровихин Антон Павлович – проведение процесса отжига; сопоставление экспериментальных данных с результатами численного моделирования; анализ экспериментальных результатов.

Никитин Андрей Александрович – подготовка текста статьи; измерение передаточных характеристик тестовых элементов; обсуждение результатов.

Аболмасов Сергей Николаевич – осаждение пленок нитрида кремния.

Сташкевич Андрей Александрович – анализ литературы по теме исследования; разработка методик проведения экспериментов; обсуждение результатов.

Теруков Евгений Иванович – руководство работами по технологии осаждения пленок нитрида кремния и отжига волноведущих структур на их основе.

Еськов Андрей Владимирович – численное моделирование; обсуждение результатов.

Семенов Александр Анатольевич – постановка задачи; обсуждение результатов; анализ результатов растровой электронной микроскопии.

Устинов Алексей Борисович – руководство научными исследованиями; разработка набора тестовых элементов; обсуждение результатов; подготовка статьи.

Author's contribution

Alexander A. Ershov, preparation of the paper text; measurement of the transmission characteristics of test elements.

Kirill N. Chekmezov, preparation of a program, and analytical modeling of the transmission characteristics of the ring resonators.

Anton P. Burovikhin, thermal annealing of the waveguides; comparison of experimental data with the results of numerical simulation; analysis of experimental results.

Andrey A. Nikitin, preparation of the paper text; measurement of the transmission characteristics of test elements; discussion of the results.

Sergey N. Abolmasov, deposition of the silicon nitride films.

Andrey A. Stashkevich, literature review; development of research methods; discussion of the results.

Evgeniy I. Terukov, supervision of SiN_x deposition and thermal annealing processes.

Andrey V. Eskov, numerical modeling; discussion of the results.

Alexander A. Semenov, the problem definition; discussion of the results; analysis of the scanning electron microscope images.

Alexey B. Ustinov, supervision of scientific research; design of the set of test elements; discussion of the results; preparation of the article.

Список литературы

1. Methods to achieve ultra-high quality factor silicon nitride resonators / X. Ji, S. Roberts, M. Corato-Zanarella, M. Lipson // *APL Photonics*. 2021. Vol. 6, iss. 7. P. 071101. doi: 10.1063/5.0057881
2. High-yield, wafer-scale fabrication of ultralow-loss, dispersion-engineered silicon nitride photonic circuits / J. Liu, G. Huang, R. N. Wang, J. He, A. S. Raja, T. Liu, N. J. Engelsen, T. J. Kippenberg // *Nature communications*. 2021. Vol. 12, iss. 1. P. 2236. doi: 10.1038/s41467-021-21973-z
3. Hertz-linewidth semiconductor lasers using CMOS-ready ultra-high-Q microresonators / W. Jin, Q. F. Yang, L. Chang, B. Shen, H. Wang, M. A. Leal, L. Wu, M. Gao, A. Feshali, M. Paniccia, K. J. Vahala, J. E. Bowers // *Nature Photonics*. 2021. Vol. 15, iss. 5. P. 346–353. doi: 10.1038/s41566-021-00761-7
4. Ultralow-loss tightly confining Si₃N₄ waveguides and high-Q microresonators / H. El Dirani, L. Youssef, C. Petit-Etienne, S. Kerdiles, P. Grosse, C. Monat, E. Pargon, C. Sciancalepore // *Optics express*. 2019. Vol. 27, iss. 21. P. 30726–30740. doi: 10.1364/OE.27.030726
5. Pushing the limits of CMOS optical parametric amplifiers with USRN:Si₇N₃ above the two-photon absorption edge / K. J. A. Ooi, D. K. T. Ng, T. Wang, A. K. L. Chee, S. K. Ng, Q. Wang, L. K. Ang, A. M. Agarwal, L. C. Kimerling, D. T. H. Tan // *Nature communications*. 2017. Vol. 8, iss. 1. P. 13878. doi: 10.1038/ncomms13878
6. Radiation hardness of high-Q silicon nitride microresonators for space compatible integrated optics / V. Brasch, Q. F. Chen, S. Schiller, T. J. Kippenberg // *Optics express*. 2014. Vol. 22, iss. 25. P. 30786–30794. doi: 10.1364/OE.22.030786
7. Marpaung D., Yao J., Capmany J. Integrated microwave photonics // *Nature photonics*. 2019. Vol. 13, iss. 2. P. 80–90. doi: 10.1038/s41566-018-0310-5
8. Silicon nitride in silicon photonics / D. J. Blumenthal, R. Heideman, D. Geuzebroek, A. Leinse, C. Roeloffzen // *Proceedings of the IEEE*. 2018. Vol. 106, iss. 12. P. 2209–2231. doi: 10.1109/JPROC.2018.2861576
9. Dissipative Kerr solitons in optical microresonators / T. J. Kippenberg, A. L. Gaeta, M. Lipson, M. L. Gorodetsky // *Science*. 2018. Vol. 361, iss. 6402. P. eaan8083. doi: 10.1126/science.aan808
10. Capmany J., Novak D. Microwave photonics combines two worlds // *Nature photonics*. 2007. Vol. 1, iss. 6. P. 319–330. doi: 10.1038/nphoton.2007.89
11. Marpaung D., Yao J., Capmany J. Integrated microwave photonics // *Nature photonics*. 2019. Vol. 13, iss. 2. P. 80–90. doi: 10.1038/s41566-018-0310-5
12. Photonic damascene process for low-loss, high-confinement silicon nitride waveguides / M. H. P. Pfeiffer, C. Herkommer, J. Liu, T. Morais, M. Zervas, M. Geiselmann, T. J. Kippenberg // *IEEE J. of selected topics in quantum electronics*. 2018. Vol. 24, iss. 4. P. 1–11. doi: 10.1109/JSTQE.2018.2808258
13. Nonlinear silicon nitride waveguides based on a PECVD deposition platform / L. Wang, W. Xie, D. Van Thourhout, Y. Zhang, H. Yu, S. Wang // *Optics express*. 2018. Vol. 26, iss. 8. P. 9645–9654. doi: 10.1364/OE.26.009645
14. Ay F., Aydinli A. Comparative investigation of hydrogen bonding in silicon based PECVD grown dielectrics for optical waveguides // *Optical materials*. 2004. Vol. 26, iss. 1. P. 33–46. doi: 10.1016/j.optmat.2003.12.004
15. Fabrication techniques for low-loss silicon nitride waveguides / M. J. Shaw, J. Guo, G. A. Vawter, S. Habermehl, C. T. Sullivan // *Micromachining Technology for Micro-Optics and Nano-Optics III*. 2005. Vol. 2720. P. 109–118. doi: 10.1117/12.588828
16. 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. Т. 21, № 6. С. 352–367. doi: 10.17587/nmst.21.352-367
17. Extraction of the optical properties of waveguides through the characterization of silicon-on-insulator integrated circuits / A. A. Ershov, A. I. Ere-meev, A. A. Nikitin, A. B. Ustinov // *Microwave and Optical Technology Letters*. 2023. Vol. 65, iss. 8. P. 2451–2455. doi: 10.1002/mop.33675
18. Silicon microring resonators / W. Bogaerts, P. De Heyn, T. Van Vaerenbergh, K. De Vos, S. Kumar Selvaraja, T. Claes, P. Dumon, P. Bienstman, D. Van Thourhout, R. Baets // *Laser & Photonics Reviews*. 2012. Vol. 6, iss. 1. P. 47–73. doi: 10.1002/lpor.201100017

19. Nonlinear frequency response of the multi-resonant ring cavities / A. A. Nikitin, V. V. Vitko, M. A. Cherkasskii, A. B. Ustinov, B. A. Kalinikos // Results in Physics. 2020. Vol. 18. P. 103279. doi: 10.1016/j.rinp.2020.103279

Информация об авторах

Ершов Александр Александрович – аспирант кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 12 научных работ. Сфера научных интересов – радиофотоника; интегральная оптика. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: aaershov@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3600-4946>

Чекмезов Кирилл Николаевич – студент 1-го курса магистратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – радиофотоника; нелинейная динамика. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: chekmezovkn@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-9179-1112>

Буровихин Антон Павлович – инженер 2-й категории лаборатории технологии материалов и элементов интегральной радиофотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 17 научных работ. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрики; мультиферроики; пьезоэлектричество; электрокалорика. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: antonburovihin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5147-0630>

Никитин Андрей Александрович – кандидат физико-математических наук (2011), доцент кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – нелинейные волновые процессы; радиофотоника; спин-волновая электроника. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: aanikitin@etu.com
<https://orcid.org/0000-0002-4226-4341>

Аболмасов Сергей Николаевич – кандидат физико-математических наук (2003), ведущий технолог ООО "НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике", научный сотрудник Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе. Автор более 60 научных работ. Сфера научных интересов – физика низкотемпературных плазменных разрядов; газофазное осаждение; тонкопленочные солнечные элементы. Адрес: ООО "НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике", ул. Политехническая, д. 28, Санкт-Петербург, 194064, Россия
E-mail: s.abolmasov@hevelsolar.com
<https://orcid.org/0000-0002-8877-8372>

Сташкевич Андрей Александрович – доктор физико-математических наук (1995), заслуженный профессор (2020) Галилеевского института (Institut Galilée) Университета Сорбонна Париж Север (Лаборатория физико-химических свойств материалов LSPM). Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – спинтроника; магноника; мандельштам-бриллюэновская спектроскопия; радиофотоника. Адрес: Лаборатория физико-химических свойств материалов, LSPM – CNRS UPR3407, Ж. Б. Клемана авеню, д. 99, Вилльтанёз, 93 430, Франция
E-mail: stachkevitch@univ-paris13.fr

Теруков Евгений Иванович – доктор технических наук (1992), заведующий лабораторией Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН, профессор кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 500 научных работ. Сфера научных интересов – физика и технология аморфных полупроводников, возобновляемая энергетика. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: eug.terukov@mail.ioffe.ru

Еськов Андрей Владимирович – кандидат технических наук (2014), руководитель лаборатории технологии материалов и элементов интегральной радиофотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрики; электрокалорический эффект; пирозлектрический эффект; мультиферроики; интегральная радиофотоника.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: aeskow@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5770-1543>

Семенов Александр Анатольевич – доктор технических наук (2017), заведующий кафедрой физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов – электроника СВЧ; сегнетоэлектрики; технология тонких пленок; мультиферроики; интегральная радиофотоника.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: aasemenov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2348-3773>

Устинов Алексей Борисович – доктор физико-математических наук (2012), профессор кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 300 научных работ. Сфера научных интересов – линейные и нелинейные колебания и волны в магнитных пленках и слоистых структурах; СВЧ-электроника; радиофотоника.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: Ustinov_rus@yahoo.com

<https://orcid.org/0000-0002-7382-9210>

References

1. Ji X., Roberts S., Corato-Zanarella M., Lipson M. Methods to Achieve Ultra-High Quality Factor Silicon Nitride Resonators. *APL Photonics*. 2021, vol. 6, iss. 7, p. 071101. doi: 10.1063/5.0057881
2. Liu J., Huang G., Wang R. N., He J., Raja A. S., Liu T., Engelsen N. J., Kippenberg T. J. High-Yield, Wafer-Scale Fabrication of Ultralow-Loss, Dispersion-Engineered Silicon Nitride Photonic Circuits. *Nature Communications*. 2021, vol. 12, iss. 1, p. 2236. doi: 10.1038/s41467-021-21973-z
3. Jin W., Yang Q. F., Chang L., Shen B., Wang H., Leal M. A., Wu L., Gao M., Feshali A., Panicia M., Vahala K. J., Bowers J. E. Hertz-Line-width Semiconductor Lasers Using CMOS-Ready Ultra-High-Q Microresonators. *Nature Photonics*. 2021, vol. 15, iss. 5, pp. 346–353. doi: 10.1038/s41566-021-00761-7
4. El Dirani H., Youssef L., Petit-Etienne C., Kerdiles S., Grosse P., Monat C., Pargon E., Sciancalepore C. Ultralow-Loss Tightly Confining Si₃N₄ Waveguides and High-Q Microresonators. *Optics Express*. 2019, vol. 27, iss. 21, pp. 30726–30740. doi: 10.1364/OE.27.030726
5. Ooi K. J. A., Ng D. K. T., Wang T., Chee A. K. L., Ng S. K., Wang Q., Ang L. K., Agarwal A. M., Kimerling L. C., Tan D. T. H. Pushing the Limits of CMOS Optical Parametric Amplifiers with USRN:Si₇N₃ Above the Two-Photon Absorption Edge. *Nature Communications*. 2017, vol. 8, iss. 1, p. 13878. doi: 10.1038/ncomms13878
6. Brasch V., Chen Q. F., Schiller S., Kippenberg T. J. Radiation Hardness of High-Q Silicon Nitride Microresonators for Space Compatible Integrated Optics. *Optics Express*. 2014, vol. 22, iss. 25, pp. 30786–30794. doi: 10.1364/OE.22.030786
7. Marpaung D., Yao J., Capmany J. Integrated Microwave Photonics. *Nature Photonics*. 2019, vol. 13, iss. 2, pp. 80–90. doi: 10.1038/s41566-018-0310-5
8. Blumenthal D. J., Heideman R., Geuzebroek D., Leinse A., Roeloffzen C. Silicon Nitride in Silicon Photonics. *Proc. of the IEEE*. 2018, vol. 106, iss. 12, pp. 2209–2231. doi: 10.1109/JPROC.2018.2861576
9. Kippenberg T. J., Gaeta A. L., Lipson M., Gorodetsky M. L. Dissipative Kerr Solitons in Optical Microresonators. *Science*. 2018, vol. 361, iss. 6402, p. eaan8083. doi: 10.1126/science.aan808
10. Capmany J., Novak D. Microwave Photonics Combines Two Worlds. *Nature Photonics*. 2007, vol. 1, iss. 6, pp. 319–330. doi: 10.1038/nphoton.2007.89
11. Marpaung D., Yao J., Capmany J. Integrated Microwave Photonics. *Nature Photonics*. 2019, vol. 13, iss. 2, pp. 80–90. doi: 10.1038/s41566-018-0310-5
12. Pfeiffer M. H. P., Herkommer C., Liu J., Morais T., Zervas M., Geiselmann M., Kippenberg T. J. Photonic Damascene Process for Low-Loss, High-Confinement Silicon Nitride Waveguides. *IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2018, vol. 24, iss. 4, pp. 1–11. doi: 10.1109/JSTQE.2018.2808258
13. Wang L., Xie W., Van Thourhout D., Zhang Y., Yu H., Wang S. Nonlinear Silicon Nitride Waveguides Based on a PECVD Deposition Platform. *Optics Express*. 2018, vol. 26, iss. 8, pp. 9645–9654. doi: 10.1364/OE.26.009645
14. Ay F., Aydinli A. Comparative Investigation of Hydrogen Bonding in Silicon Based PECVD Grown

Dielectrics for Optical Waveguides. Optical Materials. 2004, vol. 26, iss. 1, pp. 33–46. doi: 10.1016/j.optmat.2003.12.004

15. Shaw M. J., Guo J., Vawter G. A., Habermehl S., Sullivan C. T. Fabrication Techniques for Low-Loss Silicon Nitride Waveguides. Micromachining Technology for Micro-Optics and Nano-Optics III. 2005, vol. 2720, pp. 109–118. doi: 10.1117/12.588828

16. Vasilev V. Yu. Silicon Nitride Thin Film Deposition for Microelectronics and Microsystems Technologies. Part 8. Hydrogen Influence on Basic Film Properties. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2019, vol. 21, no. 6, pp. 352–367. doi: 10.17587/nmst.21.352-367 (In Russ.)

17. Ershov A. A., Ereemeev A. I., Nikitin A. A., Ustinov A. B. Extraction of the Optical Properties of Waveguides Through the Characterization of Silicon-On-Insulator Integrated Circuits. Microwave and Optical Technology Letters. 2023, vol. 65, iss. 8, pp. 2451–2455. doi: 10.1002/mop.33675

18. Bogaerts W., De Heyn P., Van Vaerenbergh T., De Vos K., Kumar Selvaraja S., Claes T., Dumon P., Bienstman P., Van Thourhout D., Baets R. Silicon Microring Resonators. Laser & Photonics Reviews. 2012, vol. 6, iss. 1, pp. 47–73. doi: 10.1002/lpor.201100017

19. Nikitin A. A., Vitko V. V., Cherkasskii M. A., Ustinov A. B., Kalinikos B. A. Nonlinear Frequency Response of the Multi-Resonant Ring Cavities. Results in Physics. 2020, vol. 18, p. 103279. doi: 10.1016/j.rinp.2020.103279

Information about the authors

Alexander A. Ershov, Postgraduate student of the Department of Physical Electronics and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 12 scientific publications. Area of expertise: microwave photonics; integrated optics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: aaershov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3600-4946>

Kirill N. Chekmezov, 1-st year master degree student of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 1 scientific publication. Area of expertise: microwave photonics; nonlinear dynamics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: chekmezovkn@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-9179-1112>

Anton P. Burovikhin, engineer of the Laboratory of Technology of Materials and Elements of Integrated Radiophotonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 17 scientific publications. Area of expertise: ferroelectrics; multiferroics; pyro-electricity; electrocaloris.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: antonburovihin@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5147-0630>

Andrey A. Nikitin, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2011), Associate Professor of the Department of Physical Electronics and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: nonlinear dynamics; microwave photonics; spin wave electronics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: aanikitin@etu.com

<https://orcid.org/0000-0002-4226-4341>

Sergey N. Abolmasov, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2003), leading technologist of the Scientific and Technical Center of Thin Film Technologies in Energy LLC, research fellow at the Ioffe Institute. The author of more than 60 scientific publications. Area of expertise: physics of low-temperature plasma discharges; chemical vapor deposition; thin-film solar cells.

Address: Scientific and Technical Center of Thin Film Technologies in Energy LLC, 28, Politekhnicheskaya St., St Petersburg 194064, Russia

E-mail: s.abolmasov@hevelsolar.com

<https://orcid.org/0000-0002-8877-8372>

Andrey A. Stashkevich, Dr Sci. (Phys.-Math.) (1994), Emeritus Professor (2020) of Physics, Institut Galilee, Université Sorbonne Paris Nord. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: spintronics; magnonics; Brillouin spectroscopy; radiophotonics.

Address: Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux- LSPM – CNRS UPR3407, 99, J. B. Clement Ave., Villetaneuse 93 430, France

E-mail: stachkevitch@univ-paris13.fr

Evgeniy I. Terukov, Dr Sci. (Eng.) (1993), Vice Director of Science of the Scientific and Technical Center for Thin-Film Technologies in Energy at the Ioffe Institute. Professor of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 500 scientific publications. Area of expertise: physics and technology of amorphous semiconductors; renewable energy.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: eug.terukov@mail.ioffe.ru

Andrey V. Eskov, Cand. Sci. (Eng.) (2014), Head of the Laboratory of Technology of Materials and Elements of Integrated Microwave Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: ferroelectrics; electrocaloric effect; pyroelectric effect; multiferroics; integrated microwave photonics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: aeskow@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5770-1543>

Alexander A. Semenov, Dr Sci. (Eng.) (2017), Head of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: microwave electronics; thin films technology; ferroelectrics; multiferroics; integrated microwave photonics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: aasemenov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2348-3773>

Alexey B. Ustinov, Dr. Sci. (Phys.-Math.) (2012), Professor of the Department of Physical Electronics and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 300 scientific publications. Area of expertise: linear and nonlinear properties of oscillations and waves in ferromagnetic films and layered structures; microwave devices, microwave photonics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: Ustinov_rus@yahoo.com

<https://orcid.org/0000-0002-7382-9210>
