

# Методика неразрушающего контроля параметров нитрид-кремниевых фотонных интегральных схем

А.А. Ершов, А.А. Никитин, А.И. Еремеев, А.В. Еськов, А.А. Семенов, А.Б. Устинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** В работе приведены результаты исследования фотонных интегральных схем, изготовленных на платформе нитрида кремния. Поперечное сечение волноводов составляет  $900 \times 400$  нм<sup>2</sup>. Исследованы оптические свойства фотонных интегральных схем методом неразрушающего контроля. Из экспериментальных передаточных характеристик, прямого волновода, волноводного ответвителя и кольцевого резонатора найдены эффективность ввода/вывода брэгговских преобразователей, коэффициент связи по мощности и потери на распространение, а также групповой эффективный показатель преломления. Полученные свойства были использованы для моделирования передаточных характеристик интерферометра Маха-Цендера. Высокая точность совпадения результатов расчётов с экспериментальными данными подтверждает применимость методики неразрушающего контроля для определения параметров фотонных интегральных схем.

**Ключевые слова:** радиофотоника, кольцевой резонатор, фотонные интегральные схемы, нитрид кремния

## 1. Введение

В настоящее время фотонные интегральные схемы (ФИС) находят широкое применение для создания не только оптических, но и радиофотонных приборов и устройств, используемых как для генерации, так и для обработки сигналов сверхвысокочастотного диапазона принципами оптики и оптоэлектроники [1, 2]. Одной из ключевых технологий изготовления пассивных ФИС является нитрид кремния, который используется для создания оптических микроволноводов. Отличительная особенность микроволноводов из нитрида кремния заключается в сверхнизких потерях на распространение по сравнению с другими платформами, которые могут достигать 0,01 дБ/см при минимальном радиусе закругления 80 мкм [3, 4]. В сочетании со сравнительно низким контрастом показателей преломления ( $n_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 2$ ,  $n_{\text{SiO}_2} = 1,44$ ), обеспечивающим высокую степень интеграции, а также совместимостью с КМОП-технологией нитрид-кремниевая платформа является особенно привлекательной для применения в современной интегральной радиофотонике [5 – 7]. Данные преимущества позволяют создавать такие структуры, как линии задержки, фильтры, резонаторы, сенсоры [8 – 10]. Кроме того, благодаря высокой керровской нелинейности и малому нелинейному затуханию нитрид-кремниевые структуры используются в генераторах сетки частот и преобразователях длины волны [11 – 15].

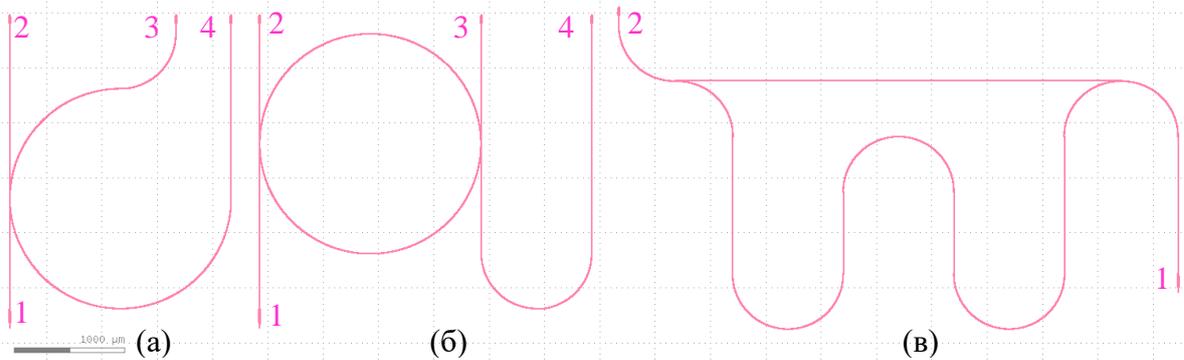
Оптические свойства ФИС сильно зависят не только от материальных параметров нитрида и оксида кремния, определяемых технологией осаждения, но и от геометрии волноведущих структур, определяемых технологиями литографии и травления. Определение оптических свойств и их контроль является важным не только в процессе отработки технологии изготовления, но и в рамках серийного производства. Поэтому актуальной задачей является разработка методики неразрушающего контроля оптических параметров ФИС. Одним из таких методов является использование миниатюрных контрольных элементов [16], оптические свойства которых однозначно связаны с их передаточными характеристиками. В таком методе оптические свойства

исследуемых чипов определяются путём измерения передаточных характеристик контрольных элементов. В данной работе предложенная методика использована для описания отечественных ФИС, изготовленных из нитрида кремния.

## 2. Описание исследований

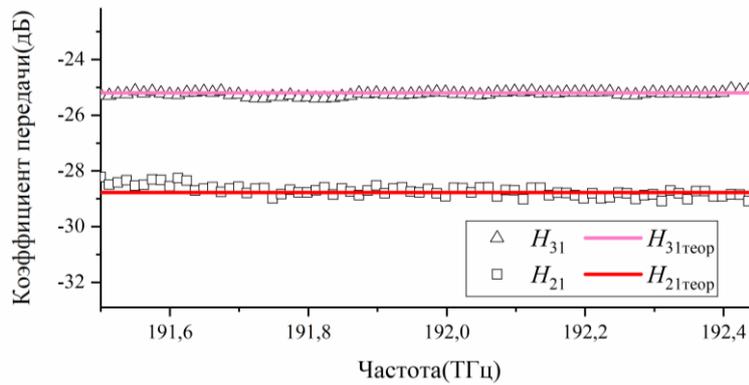
В соответствии с предложенной методикой был изготовлен оптический чип, содержащий следующие интегральные элементы: прямые волноводы, волноводные кольцевые ответвители (рисунок 1 (а)), кольцевые резонаторы (рисунок 1 (б)) и интерферометр Маха-Цендера (рисунок 1 (в)). Радиус кольца составлял 1 мм, а разность оптического хода в интерферометре – 6,28 мм. Поперечное сечение оптических микроволноводов составляло  $900 \times 400 \text{ нм}^2$ , расстояние между связанными микроволноводами – 500 нм.

Измерение передаточных характеристик производилось при помощи оптического анализатора компонентов высокого разрешения Aragon photonics HDCA (High Definition Component Analyzer). Ввод и вывод излучения осуществлялся при помощи линзованных оптических волокон, закреплённых в линейные трансляторы. В качестве элемента связи между волокном и микроволноводом использовались брэгговские преобразователи и сужающиеся переходы.



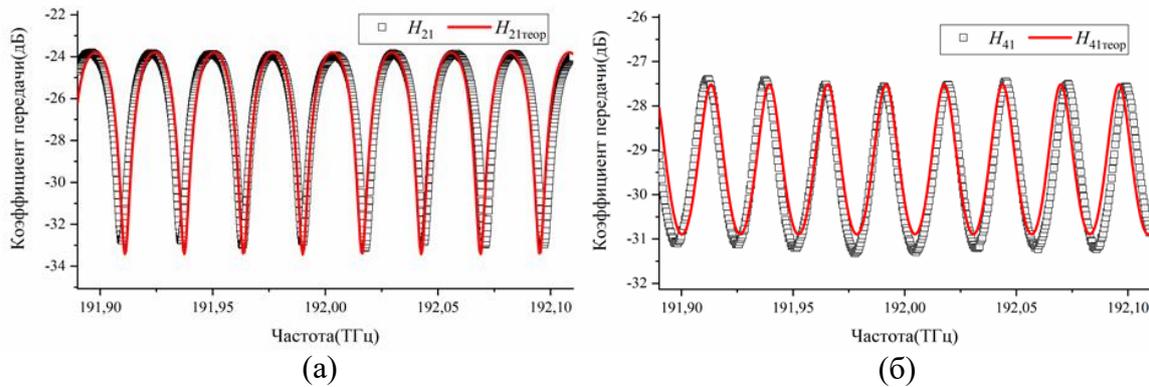
**Рисунок 1.** Топологии кольцевого волноводного ответвителя (а), кольцевого резонатора (б) и интерферометра Маха-Цендера (в)

Исследование передаточных характеристик проводилось в соответствии с методом, описанным в работе [16]. Вначале исследовались передаточные характеристики прямого волновода и волноводного ответвителя, образованного прямым волноводом и полукольцом. Экспериментальные передаточные характеристики волноводного ответвителя представлены символами рисунке 2. Квадраты и треугольники показывают характеристик измеренные с выходов 2 и 3 соответственно. Из полученных передаточных характеристик определялись эффективность ввода/вывода излучения, а также коэффициент связи по мощности, который составил  $\kappa = 0,69703$ . На рисунке 2 красной и розовой линией показаны рассчитанные коэффициенты передачи на выходах 2 и 3 соответственно. Расчёт выполнен для найденных значений коэффициента связи и эффективности ввода/вывода излучения.



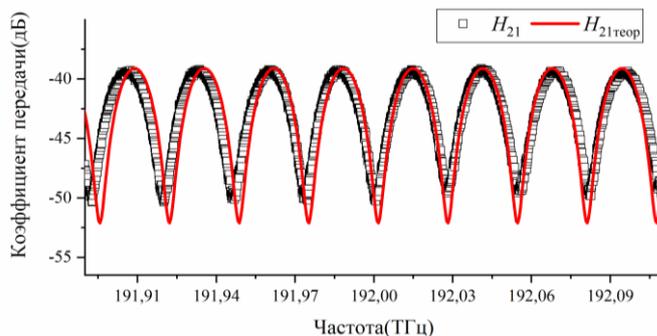
**Рисунок 2.** Передаточные характеристики волноводного ответвителя. Символами показаны экспериментальные данные, линиями – теоретические расчёты

На следующем этапе исследовались передаточные характеристики кольцевого резонатора. На рисунках 3 (а) и 3 (б) символами показаны передаточные характеристики кольцевого резонатора, измеренные на выходах 2 и 4 соответственно. В соответствии с работой [16] полученные характеристики использованы для определения закона дисперсии, а также потерь на распространение  $\alpha$  волн в микроволноводах из нитрида кремния. Эти характеристики определялись путём сопоставления экспериментальных и теоретических передаточных характеристик. Расчёт передаточных характеристик был выполнен по аналитической теории [17]. В результате были получены следующие характеристики: групповой эффективный показатель преломления  $n_g = 1,814$ ,  $\alpha = 0,63$  дБ/мм. Передаточные характеристики кольцевых резонаторов, рассчитанные для полученных параметров, показаны на рисунках 3 (а) и 3 (б) сплошными линиями.



**Рисунок 3.** Коэффициент передачи кольцевого резонатора на выходе 2 (а) и на выходе 4 (б). Символами показаны экспериментальные данные, сплошной линией показаны теоретические расчёты

На заключительном этапе для проверки полученных результатов было произведено сопоставление измеренных и рассчитанных передаточных характеристик интерферометра Маха-Цендера. При расчёте использовались параметры, полученные на предыдущих этапах. Экспериментальные результаты показаны на рисунке 4 символами, а теоретические – сплошной линией. Как видно из рисунка, результаты расчёта находятся в хорошем соответствии с экспериментальными результатами, что подтверждает применимость метода определения оптических параметров ФИС.



**Рисунок 4.** Коэффициент передачи интерферометра Маха-Цендера. Символами показаны экспериментальные данные, сплошной линией – теоретический расчёт

#### 4. Заключение

В работе представлены результаты исследования оптических свойств ФИС, изготовленных из нитрид-кремниевых микроволноводов с поперечным сечением  $900 \times 400$  нм<sup>2</sup>. В результате использования описанной в работе оригинальной методики неразрушающего определения оптических свойств были найдены следующие параметры: коэффициент связи по мощности  $\kappa = 0,69703$ , потери на распространение  $\alpha = 0,63$  дБ/мм, групповой эффективный показатель преломления  $n_g = 1,814$ . Полученные параметры использовались для расчёта коэффициента передачи интерферометра Маха-Цендера. Результаты расчёта с высокой точностью совпали с экспериментальными данными. Таким образом предложенный метод применим для контроля оптических параметров ФИС, изготовленных из нитрида кремния.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект Госзадание, грант № FSEE-2022-0017).

#### Список литературы

1. Capmany J., Novak D. Microwave photonics combines two worlds // Nature photonics. – 2007. – V. 1. – P. 319.
2. Marpaung D., Yao J., Capmany J. Integrated microwave photonics // Nature photonics. – 2019. – V. 13. – N. 2. – P. 80-90.
3. Ji X. et al. Methods to achieve ultra-high quality factor silicon nitride resonators // APL Photonics. – 2021. – V. 6. – N. 7. – P. 071101.
4. Liu J. et al. High-yield, wafer-scale fabrication of ultralow-loss, dispersion-engineered silicon nitride photonic circuits // Nature communications. – 2021. – V. 12. – N. 1. – P. 2236.
5. Blumenthal D. J. et al. Silicon nitride in silicon photonics // Proceedings of the IEEE. – 2018. – V. 106. – N. 12. – P. 2209-2231.
6. Pfeiffer M. H. P. et al. Photonic damascene process for low-loss, high-confinement silicon nitride waveguides // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. – 2018. – V. 24. – N. 4. – P. 1-11.
7. Никитин А. А. и др. Исследование технологии осаждения пленок нитрида кремния для применения в фотонных интегральных схемах // Фотоника. – 2022. – Т. 16. – №. 4. – С. 296-305.
8. Gondarenko A., Levy J. S., Lipson M. High confinement micron-scale silicon nitride high Q ring resonator // Optics express. – 2009. – V. 17. – N. 14. – P. 11366-11370.
9. Sharma T. et al. Review of recent progress on silicon nitride-based photonic integrated circuits // IEEE Access. – 2020. – V. 8. – P. 195436-195446.
10. Mohanty A. et al. Reconfigurable nanophotonic silicon probes for sub-millisecond deep-brain optical stimulation // Nature biomedical engineering. – 2020. – V. 4. – N. 2. – P. 223-231.
11. Dutt A. et al. Tunable squeezing using coupled ring resonators on a silicon nitride chip // Optics letters. – 2016. – V. 41. – N. 2. – P. 223-226.
12. Pasquazi A. et al. Micro-combs: A novel generation of optical sources // Physics Reports. – 2018. – V. 729. – P. 1-81.

13. Gaeta A. L., Lipson M., Kippenberg T. J. Photonic-chip-based frequency combs // *Nature photonics*. – 2019. – V. 13. – N. 3. – P. 158-169.
14. Дмитриев Н. Ю. и др. Определение дисперсионных характеристик интегральных оптических микрорезонаторов и генерация в них когерентных оптических частотных гребенок // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2022. – Т. 162. – № 1. – С. 14-26.
15. Kondratiev N. M. et al. Recent advances in laser self-injection locking to high-Q microresonators // *Frontiers of Physics*. – 2023. – V. 18. – N. 2. – P. 21305.
16. Ershov A. A. et al. Extraction of the optical properties of waveguides through the characterization of silicon-on-insulator integrated circuits // *Microwave and Optical Technology Letters*. – 2023. – V. 65. – N. 8. – P. 2451-2455.
17. Nikitin A. A. et al. Nonlinear frequency response of the multi-resonant ring cavities // *Results in Physics*. – 2020. – Vol. 18. – P. 103279.