

## Влияние температурного отжига на волноведущие свойства оптических нитрид-кремниевых волноводов разной толщины

А.А. Ершов<sup>1</sup>, К.Н. Чекмезов<sup>1</sup>, А.П. Буровихин<sup>1</sup>, А.А. Никитин<sup>1</sup>, С.Н. Аболмасов<sup>2,3</sup>,  
А.А. Сташкевич<sup>4</sup>, Е.И. Теруков<sup>1,2,3</sup>, А.В. Еськов<sup>1</sup>, А.А. Семенов<sup>1</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>ООО «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике», Санкт-Петербург, Россия

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

<sup>4</sup>Университет Сорбонна Париж Север, Вилльтанёз, Франция

**Аннотация:** В работе исследовалось влияние температурного отжига на волноведущие свойства волноводов из нитрида кремния в диапазоне частот от 185 до 196 ТГц. Показано, что отжиг уменьшает затухание в волноводах сечением  $900 \times 400$  нм<sup>2</sup> и  $900 \times 700$  нм<sup>2</sup> до 4 дБ/см.

**Ключевые слова:** радиофотоника, отжиг, фотонные интегральные схемы, нитрид кремния

Нитрид кремния является одним из перспективных материалов для изготовления фотонных интегральных схем (ФИС) [1–3]. Низкие потери на распространение, отсутствие двухфотонного поглощения, сильная керровская нелинейность, сравнительно высокий контраст показателей преломления и, наконец, совместимость с КМОП технологией позволяют создавать как линейные [4], так и нелинейные [5] ФИС.

Одной из перспективных технологий получения пленок нитрида кремния является метод плазмохимического осаждения из газовой фазы. Применение этого метода ограничено высоким затуханием, причиной которого является поглощение на N-H и Si-H комплексах, оставшихся в процессе роста пленок [6]. Одним из способов разрушения этих комплексов является температурный отжиг.

В докладе представлены результаты исследования влияния температурного отжига при температуре 600°C в течении 30 мин. в вакууме на волноведущие свойства оптических нитрид-кремниевых волноводов. Для этого использовался оригинальный метод неразрушающего контроля оптических параметров ФИС [7]. Следуя этому методу был изготовлен набор тестовых элементов на основе волноводов из нитрида кремния с поперечными сечениями  $900 \times 400$  нм<sup>2</sup> и  $900 \times 700$  нм<sup>2</sup>. В набор входили прямые волноводы различной длины; кольцевой резонатор радиусом 1 мм; волноводный ответвитель, состоящий из полукольца, связанного с прямым волноводом. Экспериментальное исследование передаточных характеристик проводилось при помощи оптического анализатора цепей высокого разрешения в диапазоне от 185 ТГц до 196 ТГц. В результате были получены частотные зависимости коэффициента связи кольцевого резонатора с прямым волноводом, декремента затухания и группового показателя преломления до и после температурного отжига.

Показано, что до отжига исследованные волноводы демонстрировали затухание 4–5 дБ/см в диапазоне от 185 ТГц до 190 ТГц. На частотах выше 190 ТГц затухание в таких волноводах резко возрастало до 12–14 дБ/см, что могло быть обусловлено поглощением излучения на второй гармонике колебаний в N-H комплексах. После

температурного отжига декремент затухания в волноводах  $900 \times 400$  нм<sup>2</sup> и  $900 \times 700$  нм<sup>2</sup> уменьшился до 4 дБ/см в исследуемой полосе частот, что свидетельствует о разрушении N-H комплексов. Показано, что исследуемые кольцевые резонаторы оказались сильно связаны с подводными волноводами, а незначительное изменение геометрии и/или отжиг сильно влияли на значение коэффициента связи. Кроме того, в результате отжига значения групповых показателей преломления возрастали и приближались к теоретическим.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения Государственного задания № 075-01438-22-07 и гранта № FSEE-2022-0017

#### Список литературы

1. Ji X. et al. Methods to achieve ultra-high quality factor silicon nitride resonators // *APL Photonics*. – 2021. – V. 6. – N. 7. – P. 071101.
2. 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.
3. Marpaung D., Yao J., Capmany J. Integrated microwave photonics // *Nature photonics*. – 2019. – V. 13. – N. 2. – P. 80-90.
4. Blumenthal D. J. et al. Silicon nitride in silicon photonics // *Proceedings of the IEEE*. – 2018. – V. 106. – N. 12. – P. 2209-2231.
5. Herr T., Gorodetsky M. L., Kippenberg T. J. Dissipative Kerr solitons in optical microresonators // *Nonlinear optical cavity dynamics: from microresonators to fiber lasers*. – 2016. – С. 129-162.
6. 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.
7. 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. P. 1-5.