

# Передаточные характеристики интегральных интерферометров Маха-Цендера, изготовленных по технологии кремний на изоляторе

А.А. Ершов, Д.В. Ряйккенен, А.А. Никитин, А.Б. Устинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** В работе проведено исследование оптических интегральных интерферометров Маха-Цендера, изготовленных по технологии кремний на изоляторе. Интерферометры образованы интегральными кремниевыми волноводами с поперечным сечением  $220 \times 500$  нм<sup>2</sup> с разностью хода 85.3 мкм. В работе также представлены результаты численного расчёта передаточных характеристик интерферометров. Для расчёта передаточных характеристик использован закон дисперсии оптических волн в интегральных волноводах, полученный в программе Ansys Lumerical MODE, а также экспериментальная зависимость коэффициента передачи брэгговских преобразователей ввода-вывода. Результаты экспериментальных измерений совпадают с результатами численных расчетов.

**Ключевые слова:** интерферометр Маха-Цендера, интегральная оптика, кремний на изоляторе

## 1. Введение

В последние годы интегральная оптика занимает особое место в сфере передачи и обработки информации [1, 2, 3]. Одним из наиболее распространённых материалов для создания оптических интегральных схем является кремний. Он получил широкое распространение благодаря ряду преимуществ. Во-первых, технология кремний на изоляторе (КНИ) является хорошо изученной и совместимой с КМОП-технологией, что в перспективе представляет возможность полной интеграции электронных и оптических компонентов на одном чипе [1, 2]. Во-вторых, для оптического излучения с длиной волны больше 1.2 мкм потери на распространение не превышают 2-3 дБ/см [4, 5, 6]. В-третьих, в результате высокого контраста показателей преломления кремния ( $n = 3.476$ ) и диоксида кремния ( $n = 1.444$ ) на длине волны 1550 нм практически всё излучение локализовано в интегральном волноводе, что обеспечивает плотную упаковку компонентов на фотонных интегральных схемах. Основными преимуществами схем, изготовленных по технологии КНИ, являются высокая степень интеграции, высокая скорость передачи информации между устройствами на одном чипе, низкое энергопотребление и стоимость, а также малые габариты и вес готовых устройств. Таким образом, технология КНИ является перспективной платформой для дальнейшего развития фотонных интегральных схем и их практического применения в фотонике [1, 2, 4, 5, 7].

В данной работе проводилось исследование интерферометров Маха-Цендера, которые являются одними из ключевых элементов кремниевой фотоники. Интерферометры Маха-Цендера используются в качестве основы для создания электрооптических модуляторов, а также оптических изоляторов и различных сенсоров [6, 8 – 11].

## 2. Интегральные схемы КНИ

В работе проведено исследование интегрального волновода длиной 196.7 мкм и интерферометра Маха-Цендера с разностью хода 85.3 мкм. Структуры

изготавливались по технологии КНИ с использованием электронно-лучевой литографии и были образованы из кремниевых волноводов с поперечным сечением  $220 \times 500 \text{ нм}^2$ . Толщины нижнего и верхнего слоёв диоксида кремния составляли 2 мкм и 2.2 мкм соответственно. При проектировании структур использовались топологии брэгговских преобразователей ввода-вывода и волноводных делителей, встроенные в библиотеку интегральных компонентов SiEPIC EBeam PDK [12]. Преобразователи обеспечивают возможность ввода и вывода излучения из оптического волокна, расположенного под углом к плоскости структур. Конструкции преобразователей и делителей подробно описаны в работах [13, 14]. Топологии прямого волновода и интерферометра, спроектированные в программе KLayout, показаны на рисунках 1 (а) и 1 (б) соответственно.

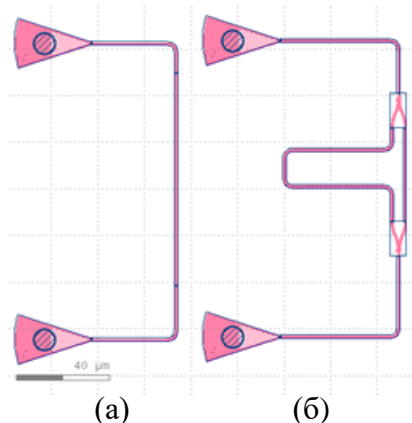


Рисунок 1. Топологии прямого волновода и интерферометра Маха-Цендера

### 3. Теоретическое описание

Для расчёта передаточных характеристик интерферометра Маха-Цендера используется следующая формула:

$$T_{\text{MZI}}(\lambda) = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{4} \left| 1 + e^{-i\beta(\lambda)\Delta L} \right|^2 \right). \quad (1)$$

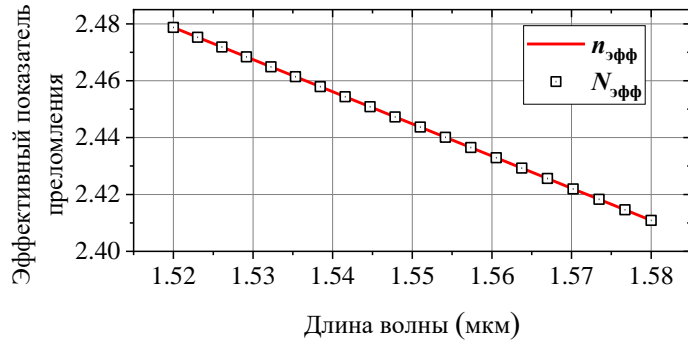
Здесь  $\beta$  – комплексная постоянная распространения, а  $\Delta L = L_1 - L_2$ , где  $L_1$  и  $L_2$  суть длины первого и второго плеч интерферометра соответственно. Для расчёта постоянной распространения используется зависимость эффективного показателя преломления от длины волны  $n_{\text{эфф}}(\lambda)$ :

$$\beta(\lambda) = \frac{2\pi n_{\text{эфф}}(\lambda)}{\lambda} - i \frac{\alpha}{2}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – потери на распространение в КНИ волноводе. В расчёте использовалось типичное значение  $\alpha = 3 \text{ дБ/см}$ . Зависимость эффективного показателя преломления от длины волны  $n_{\text{эфф}}(\lambda)$ , которая была получена при помощи программного пакета Ansys Lumerical MODE, показана на рисунке 2 сплошной красной линией. Эта зависимость была аппроксимирована следующим выражением:

$$N_{\text{эфф}}(\lambda) = 2.44483 - 1.13076(\lambda - \lambda_0) - 0.0403571(\lambda - \lambda_0)^2, \quad (3)$$

где  $\lambda_0$  – центральная длина волны. Зависимость, построенная по формуле (3), представлена на рисунке 2 пустыми квадратами. Как видно из этого рисунка, с увеличением длины волны происходит уменьшение величины эффективного показателя преломления.

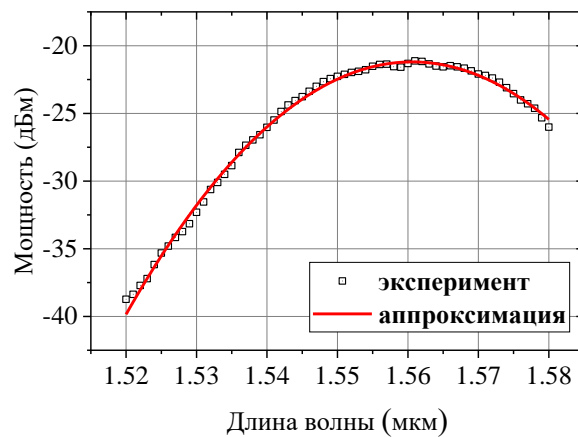


**Рисунок 2.** Зависимость эффективного показателя преломления от длины волны

На рисунке 3 пустыми квадратами показана передаточная характеристика прямого волновода (см. рисунок 1 (а)) с учетом потерь на ввод и вывод излучения через брегговские решетки. Эта зависимость аппроксимировалась следующим выражением:

$$T_b(\lambda) = -27556.6585 + 35288.00102 \cdot \lambda - 11305.81219 \cdot \lambda^2. \quad (4)$$

Как видно из рисунка, расчёты по формуле (4) (см. красная сплошная линия на рисунке 3) совпадают с экспериментальными результатами. Видно, что центральная частота брегговских преобразователей соответствует 1560 нм.



**Рисунок 3.** Передаточная характеристика прямого волновода

Полученное выражение (4) использовалось для описания экспериментальных результатов. Передаточная характеристика интерферометра рассчитывалась по следующей формуле:

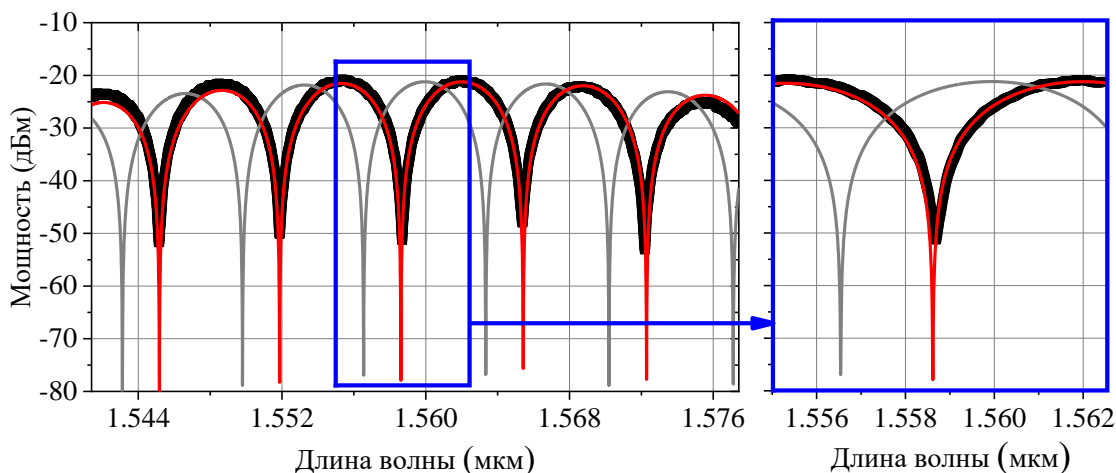
$$T(\lambda) = T_{\text{MZI}}(\lambda) + T_b(\lambda), \quad (5)$$

в которой для расчёта постоянной распространения по выражению (2) для  $T_{\text{MZI}}(\lambda)$  в качестве  $n_{\text{эфф}}(\lambda)$  использовалась функция  $N_{\text{эфф}}(\lambda)$ .

#### 4. Экспериментальные результаты

Измеренная передаточная характеристика интерферометра показана на рисунке 4 чёрными сплошными квадратами. Аналитическая зависимость, полученная по формуле (5), показана на этом рисунке серой сплошной линией. Как видно, положение экспериментальных и теоретических нулей коэффициента передачи не совпадают, что

объясняется технологическими погрешностями, возникшими при изготовлении интерферометра. Для устранения неточностей расчёта необходимо уточнение закона дисперсии. Для этого было проведено сопоставление результатов теоретических расчётов и экспериментальных измерений для волновых чисел, удовлетворяющих условию интерференции:  $\beta = (2m+1)\pi/\Delta L$ . Таким образом, было найдено значение свободного коэффициента в выражении (3), величина которого составила 2.45043. Результат расчёта с использованием уточнённого закона дисперсии показан на рисунке 4 красной сплошной линией. Как видно, результаты экспериментальных измерений совпадают с результатами численных расчётов с высокой точностью (см. вставку к рисунку 4).



**Рисунок 4.** Экспериментальная и теоретическая передаточные характеристики интерферометра Маха-Цендера с  $\Delta L = 85.3$  мкм

## 5. Заключение

В работе был исследован интерферометр Маха-Цендера, изготовленный по технологии КНИ с разностью хода 85.3 мкм. Для описания передаточных характеристик использовались закон дисперсии, полученный в Ansys Lumerical MODE, а также экспериментальная передаточная характеристика брэгговских преобразователей. Из сравнения теоретических и экспериментальных результатов был сделан вывод о необходимости уточнения теоретической модели, что было достигнуто путём подстановки в закон дисперсии экспериментальных значений волновых чисел, обеспечивающих противофазную интерференцию. Это позволило точно описать измеренную передаточную характеристику.

Работа частично поддержана **Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект "Госзадание", грант № FSEE-2020-0005).**

### Список литературы

1. Wang J., Long Y. On-chip silicon photonic signaling and processing: a review //Science Bulletin. – 2018. – Т. 63. – №. 19. – С. 1267-1310.
2. Pathak S. Photonics Integrated Circuits //Nanoelectronics. – Elsevier, 2019. – С. 219-270.
3. Nikitin A. A. et al. Carrier-induced optical bistability in the silicon micro-ring resonators under continuous wave pumping //Optics Communications. – 2021. – Т. 480. – С. 126456.
4. Tran M. A. et al. Ultra-low-loss silicon waveguides for heterogeneously integrated silicon/III-V photonics //Applied Sciences. – 2018. – Т. 8. – №. 7. – С. 1139.
5. Lipson M. Guiding, modulating, and emitting light on silicon-challenges and opportunities //Journal of Lightwave Technology. – 2005. – Т. 23. – №. 12. – С. 4222.

6. Dainesi P. et al. CMOS compatible fully integrated Mach-Zehnder interferometer in SOI technology //IEEE Photonics Technology Letters. – 2000. – T. 12. – №. 6. – C. 660-662.
7. Pierce D. T., Spicer W. E. Electronic structure of amorphous Si from photoemission and optical studies //Physical Review B. – 1972. – T. 5. – №. 8. – C. 3017.
8. Chrostowski L., Hochberg M. Silicon photonics design: from devices to systems. – Cambridge University Press, 2015. – 438 p.
9. Liao L. et al. High speed silicon Mach-Zehnder modulator //Optics express. – 2005. – T. 13. – №. 8. – C. 3129-3135.
10. Fujita J. et al. Waveguide optical isolator based on Mach-Zehnder interferometer //Applied Physics Letters. – 2000. – T. 76. – №. 16. – C. 2158-2160.
11. Xu D. X. et al. Silicon photonic integration platform—Have we found the sweet spot? //IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2014. – T. 20. – №. 4. – C. 189-205.
12. Bojko R. J. et al. Electron beam lithography writing strategies for low loss, high confinement silicon optical waveguides //Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena. – 2011. – T. 29. – №. 6. – C. 06F309.
13. Wang Y. et al. Focusing sub-wavelength grating couplers with low back reflections for rapid prototyping of silicon photonic circuits //Optics express. – 2014. – T. 22. – №. 17. – C. 20652-20662.
14. Zhang Y. et al. A compact and low loss Y-junction for submicron silicon waveguide //Optics express. – 2013. – T. 21. – №. 1. – C. 1310-1316.