

## Метод определения дисперсионных свойств микроволноводов, изготовленных по технологии кремний-на-изоляторе

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

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** в работе проведено исследование оптических интегральных схем, изготовленных по технологии кремний-на-изоляторе. Исследованы прямой волновод, волноводный ответвитель, микрокольцевой резонатор длиной 201,06 мкм и интерферометр Маха-Цендера с оптической разностью хода 312,9 мкм. Предложен метод определения дисперсионных свойств оптических микроволноводов из экспериментальных передаточных характеристик устройств на их основе, также в работе экспериментально определены коэффициент связи по мощности, декремент затухания. Полученные свойства использованы для моделирования передаточных характеристик микрокольцевого резонатора и интерферометра Маха-Цендера. Результаты моделирования с высокой точностью совпадают с экспериментальными данными, что подтверждает применимость предложенного метода.

**Ключевые слова:** кремний-на-изоляторе, интегральные оптические схемы, интерферометр Маха-Цендера, микрокольцевой резонатор

### 1. Введение

Технология кремний-на-изоляторе (КНИ) широко применяется для изготовления фотонных интегральных схем (ФИС). Совместимость с КМОП-технологией является ключевой особенностью, благодаря которой обеспечивается низкая стоимость изготовления ФИС [1].

Квазиодномодовый режим работы КНИ-микроволноводов в телекоммуникационном диапазоне длин волн (1530 нм – 1565 нм) достигается при сечении волноводящих структур  $220 \times 500 \text{ нм}^2$ . Именно такой размер микроволноводов наиболее часто используется при проектировании КНИ ФИС. Отличительной характеристикой КНИ-микроволноводов является высокий контраст показателей преломления ( $n_{\text{Si}} = 3,48$ ,  $n_{\text{SiO}_2} = 1,44$ ), что обеспечивает малый радиус изгиба и, соответственно, высокую степень интеграции элементов на ФИС. Однако в то же время такая особенность предъявляет жесткие требования к размерам волновода. Даже нанометровые отклонения от требуемой геометрии микроволновода приводят к значительному изменению не только его рабочих характеристик, но и всего проектируемого устройства [2 – 5]. Другим достоинством КНИ-технологии является низкий уровень вносимых потерь (менее 1–3 дБ/см) [4, 5], что наряду с высокой компактностью, обеспечивает высокий интерес к данной технологии для создания пассивных фотонных устройств, таких как резонаторы, фильтры, мультиплексоры, интерферометры, периодические структуры и фотонные кристаллы [6 – 11]. Отдельно отметим низкий порог возникновения нелинейных эффектов, характерных для КНИ-микроволноводов (двухфотонное поглощение, комбинационное рассеяние, термооптический эффект), которые широко используются для создания нелинейных устройств, например, ячеек памяти, логических элементов, коммутаторов и транзисторов [12 – 15].

Как упоминалось выше, рабочие характеристики КНИ-устройств сильно зависят

от геометрии микроволноводов [3, 16]. Для корректного описания ФИС необходимо определить дисперсионные свойства самого микроволновода. Эти свойства могут быть извлечены путём измерения передаточных характеристик высококомпактных опорных устройств, рабочие характеристики которых однозначно связаны с дисперсионными свойствами КНИ-микроволновода. Наличие опорных элементов на микросхеме необходимо для полного описания фотонных устройств и определения доли выхода годных.

Таким образом, целью статьи является разработка метода определения дисперсионных свойств микроволноводов с использованием следующих опорных элементов: прямого волновода, волноводного ответвителя и микрокольцевого резонатора (МКР). Свойства волновода, такие как потери на распространении  $\alpha$ , коэффициент связи  $k$  и закон дисперсии, определяются из экспериментальных передаточных характеристик.

## 2. Метод описания свойств оптических микроволноводов

В настоящее время разработаны различные методы расчёта постоянной распространения в оптических микроволноводах. Метод Маркатили является одним из методов, который позволяет с достаточной точностью аналитически описать распространение оптического излучения в высококонтрастном волноводе [17, 18]. В этом методе дисперсионные уравнения для основных мод прямоугольного волновода имеют вид:

$$k_x w = (p-1) \frac{\pi}{2} + \arctan \left( \frac{n_1^2 \gamma_x}{n_2^2 k_x} \right), \quad (1)$$

$$k_y h = (q-1) \frac{\pi}{2} + \arctan \left( \frac{\gamma_y}{k_y} \right), \quad (2)$$

$$\beta(\omega) = \sqrt{k_0^2 n_1^2 - (k_x^2 + k_y^2)}, \quad (3)$$

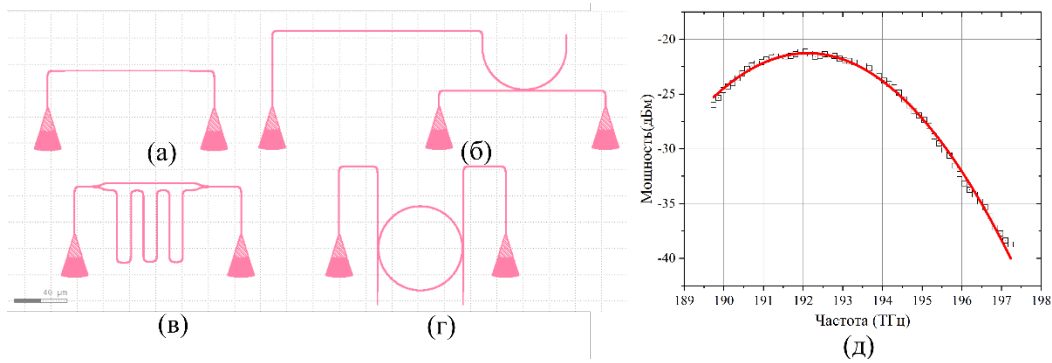
где  $k_x, k_y, \gamma_x = \sqrt{k_0^2 (n_1^2 - n_2^2) - k_x^2}$ ,  $\gamma_y = \sqrt{k_0^2 (n_1^2 - n_2^2) - k_y^2}$  – поперечные волновые числа,  $\beta(\omega)$  – постоянная распространения,  $k_0 = \omega / c$ ,  $n_1$  – показатель преломления сердцевинки (Si),  $n_2$  – показатель преломления оболочки (SiO<sub>2</sub>),  $p = 1$  и  $q = 1$  для основной моды в прямоугольном волноводе.

Известно, что спектр резонансных частот  $\omega_{рез}$  МКР длиной  $l$  однозначно определяется следующим фазовым условием:  $\beta(\omega_{рез})l = 2\pi m$ , где  $m$  – целое число, соответствующее номеру резонансной моды. Такая связь обеспечивает возможность определения дисперсионных свойств волновода путём измерения положения резонансных частот на передаточной характеристике МКР. Таким образом, МКР является основным опорным элементом, необходимым для определения дисперсии. В случае КНИ-технологии минимальный диаметр МКР достигает  $d = 10$  мкм, что делает такие опорные элементы очень компактными.

С другой стороны, передаточная характеристика интерферометра Маха-Цендера также однозначно связывает положение частот максимумов и минимумов с постоянной распространения, следовательно, такой элемент можно использовать для проверки экспериментально определённых волноведущих свойств. Аналитические выражения, описывающие передаточные характеристики МКР и интерферометра Маха-Цендера приведены ниже.

Исследуемая микросхема включает в себя прямой волновод (рисунок 1 (а)), волноводный ответвитель (рисунок 1 (б)), интерферометр Маха-Цендера с оптической разностью хода  $\Delta L = 312,9$  мкм (рисунок 1 (в)) и МКР радиусом 32 мкм (рисунок 1 (г)). Все элементы образованы кремниевыми микроволноводами с поперечным сечением  $220 \times 500$  нм<sup>2</sup>. Излучение вводится в структуры при помощи массива наклонных волокон через брэгговские преобразователи.

Экспериментальное исследование дисперсионных свойств состоит из следующих этапов. Вначале определяется эффективность ввода и вывода оптического излучения путём измерения передаточной характеристики прямого волновода (квадраты на рисунке 1 (е)). Экспериментальные результаты аппроксимируются выражением  $T_B(f) = -26410,11 + 2,75 \cdot 10^{-10} f - 7,15 \cdot 10^{-25} f^2$  (красная линия на рисунке 1 (д)).



**Рисунок 1.** Топологии прямого волновода (а), волноводного ответвителя (б), интерферометра Маха-Цендера (в), МКР (г) и передаточная характеристика прямого волновода (д)

Далее величина коэффициента связи по мощности ( $\kappa = 1,045 \cdot 10^{-3}$ ) определяется из передаточных характеристик волноводного ответвителя на связанных линиях, состоящего из полукольца радиусом 32 мкм и прямых волноводов (рисунок 1 (б)). Затем проводится экспериментальное исследование передаточной характеристики МКР, коэффициент передачи которой описывается следующим выражением:

$$T_{\text{МКР}}(f) = 10 \log_{10} \left( \frac{\kappa^2 e^{\alpha l}}{e^{2\alpha l} - 2e^{\alpha l} (1 - \kappa) \cos(\beta(f)l) + (1 - \kappa)^2} \right) + T_B(f). \quad (4)$$

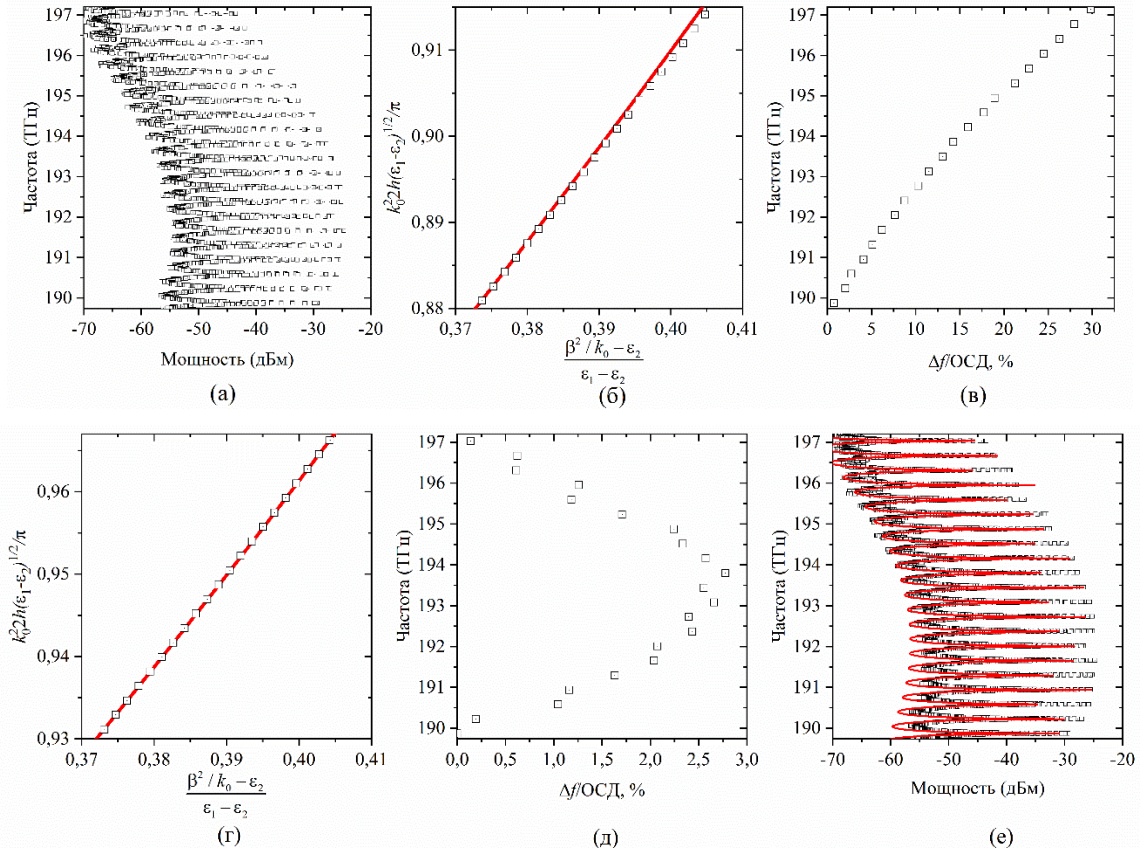
Наконец, для проверки полученных свойств оптических волноводов проводятся измерение передаточной характеристики интерферометра Маха-Цендера, математическое выражение которой имеет вид:

$$T_{\text{ИМЦ}}(f) = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{4} \left| 1 + e^{-i\beta(f)\Delta L - \alpha\Delta L/2} \right|^2 \right) + T_B(f). \quad (5)$$

### 3. Экспериментальные результаты

Дисперсионная характеристика кремниевого волновода определяется следующим образом. Первоначально закон дисперсии находится из экспериментальной передаточной характеристики МКР (см. квадраты на рисунке 2(а)). Для этого экспериментальные значения резонансных частот  $\omega_{\text{рез}}$  и соответствующие им значения постоянных распространения  $\beta = 2\pi m/l$  отображаются на плоскости нормированных частот и постоянных распространения (см. квадраты на рисунке 2 (б)). Красной линией на рисунке 2 (б) показана теоретическая дисперсионная характеристика, рассчитанная по методу Маркатили для волновода сечением

220 × 500 нм<sup>2</sup>. На рисунке 2 (в) показано различие между экспериментальными и теоретическими данными. Как видно, величина отклонения возрастает с частотой и достигает 30 % от расстояния между соседними резонансными частотами (ОСД – область свободной дисперсии) на частоте 197 ТГц. Наиболее вероятной причиной такого поведения является неточность определения размеров микроволновода [2].



**Рисунок 2.** Экспериментальная (символы) и теоретическая (линия) передаточные характеристики МКР (а) и (е); экспериментальная (символы) и теоретическая (линия) дисперсионная характеристика волновода для сечений 220 × 500 нм<sup>2</sup> (б) и 232 × 473 нм<sup>2</sup> (г); различие между экспериментальными и теоретическими данными (в) и (д)

Для уточнения поперечного сечения микроволноводов составляется система из алгебраических уравнений, удовлетворяющих экспериментально определённым резонансным частотам. В результате решения этой системы уравнений были определены локальные размеры микроволновода, которые составляют 232 × 473 нм<sup>2</sup>. Видно, что дисперсионная характеристика (красная линия на рисунке 2 (г)), рассчитанная для полученного сечения, с высокой точностью совпадает с экспериментальными данными (см. рисунки 2 (г, д)). Как видно, различия в расчёте не превышают 3 % относительно ОСД. Наконец, декремент затухания получается путём сопоставления экспериментальной (квадраты на рисунке 2 (е)) и теоретической (красная линия на рисунке 2 (е)) передаточных характеристик МКР и составляет  $\alpha = 2$  дБ/мм. Для расчёта передаточной характеристики МКР используется уточнённая геометрия волновода, а также коэффициент связи по мощности  $k$  и вносимые потери между волокнами  $T_B(f)$ . Для проверки полученных дисперсионных свойств исследуется передаточная характеристика интерферометра Маха-Цендера. Теоретическая зависимость, рассчитанная по формуле 5 для полученных параметров микроволновода, с высокой точностью согласуется с экспериментальными данными.

#### 4. Заключение

Разработан метод определения дисперсионных свойств микроволноводов, изготовленных по технологии КНИ. В основе метода лежит однозначная связь между резонансными частотами опорного МКР и значениями резонансных волновых чисел. В работе было показано, что метод Маркатили позволяет уточнить поперечное сечение микроволновода, удовлетворяющее экспериментальным данным. Полученная в результате геометрия микроволновода составила  $232 \times 473 \text{ нм}^2$ . Кроме того в работе из экспериментальных данных были найдены декремент затухания и коэффициент связи. Полученные параметры использовались для расчёта передаточных характеристик интерферометра Маха-Цендера и МКР. Результаты расчётов с высокой точностью совпадают с экспериментальными данными, что подтверждает применимость разработанного метода.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации №075-01024-21-02 от 29.09.2021 (проект FSEE-2021-0015).

#### Список литературы

1. Vivien L., Pavesi L. Handbook of silicon photonics. – Taylor & Francis, 2016.
2. Bogaerts W., Chrostowski L. Silicon photonics circuit design: methods, tools and challenges // Laser & Photonics Reviews. – 2018. – V. 12. – №. 4. – P. 1700237.
3. Selvaraja S. et al. Si photonic device uniformity improvement using wafer-scale location specific processing // IEEE Photonics Conference 2012. – IEEE, 2012. – P. 725-726.
4. Marpaung D., Yao J., Capmany J. Integrated microwave photonics // Nature photonics. – 2019. – V. 13. – №. 2. – P. 80-90.
5. Verheyen P. et al. Co-integration of Ge detectors and Si modulators in an advanced Si photonics platform // Silicon Photonics and Photonic Integrated Circuits III. – International Society for Optics and Photonics, 2012. – V. 8431. – P. 843114.
6. Bogaerts W. et al. Silicon microring resonators // Laser & Photonics Reviews. – 2012. – V. 6. – №. 1. – P. 47-73.
7. Prabhu A. M. et al. Ultracompact SOI microring add-drop filter with wide bandwidth and wide FSR // IEEE Photonics Technology Letters. – 2009. – V. 21. – №. 10. – P. 651-653.
8. Zhou L., Poon A. W. Fano resonance-based electrically reconfigurable add-drop filters in silicon microring resonator-coupled Mach-Zehnder interferometers // Optics letters. – 2007. – V. 32. – №. 7. – P. 781-783.
9. Fang Q. et al. Monolithic integration of a multiplexer/demultiplexer with a thermo-optic VOA array on an SOI platform // IEEE Photonics Technology Letters. – 2009. – V. 21. – №. 5. – P. 319-321.
10. Bogaerts W. et al. Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology // Journal of Lightwave Technology. – 2005. – V. 23. – №. 1. – P. 401-412.
11. Ding Y. et al. Fully etched apodized grating coupler on the SOI platform with - 0.58 dB coupling efficiency // Optics letters. – 2014. – V. 39. – №. 18. – P. 5348-5350.
12. Dekker R. et al. Ultrafast nonlinear all-optical processes in silicon-on-insulator waveguides // Journal of physics D: applied physics. – 2007. – V. 40. – №. 14. – P. R249.
13. Nikitin A. A. et al. Optical bistable SOI micro-ring resonators for memory applications // Optics Communications. – 2022. – V. 511. – P. 127929.
14. Nikitin A. A. et al. Carrier-induced optical bistability in the silicon micro-ring resonators under continuous wave pumping // Optics Communications. – 2021. – V. 480. – P. 126456.
15. Zhuang S. et al. Optical multistability in a cross-coupled double-ring resonator system // Optics Communications. – 2022. – V. 507. – P. 127637.
16. Lu Z. et al. Performance prediction for silicon photonics integrated circuits with layout-dependent correlated manufacturing variability // Optics express. – 2017. – V. 25. – №. 9. – P. 9712-9733.
17. Okamoto K. Fundamentals of optical waveguides. – Elsevier, 2021.
18. Marcatili E. A. J. Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics // Bell System Technical Journal. – 1969. – V. 48. – №. 7. – P. 2071-2102.