

Рефлектометрия обратного рассеяния как метод определения затухания и коэффициентов связи в кремниевых микрокольцевых резонаторах

И.А. Рябцев, А.А. Ершов, А.А. Никитин, А.Б. Устинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: в работе приведены результаты исследования оптических свойств кремниевого микрокольцевого резонатора (МКР) методом оптической рефлектометрии обратного рассеяния на длине волны 1550 нм (193,255 ТГц). Проведено сопоставление теоретических передаточных характеристик МКР, рассчитанных с использованием полученных параметров, и экспериментальных характеристик, измеренных оптическим векторным анализатором высокого разрешения. Сделан вывод о применимости метода оптической рефлектометрии для определения оптических свойств МКР в диапазоне частот от 188 ТГц до 197 ТГц.

Ключевые слова: микрокольцевой резонатор, рефлектометрия обратного рассеяния, кремний на изоляторе

1. Введение

Пассивные микрокольцевые резонаторы (МКР) являются ключевыми элементами фотонных интегральных схем (ФИС). Спектральные свойства таких структур определяются геометрией резонатора, которая может изменяться в широких пределах. Одной из наиболее распространенных технологических платформ изготовления МКР является кремний-на-изоляторе (КНИ). Популярность такой платформы обусловлена совместимостью с КМОП-технологией; высоким контрастом показателей преломления, который обеспечивает высокую плотность элементов на чипе и малые радиусы изгиба волноводов (менее 10 мкм) [1, 2]. Кремниевые МКР находят широкое применение при создании высокочастотных фильтров [3] и электрооптических модуляторов [4]. Кроме того, низкий порог возникновения нелинейных эффектов позволяет реализовывать нелинейные устройства, такие как ячейки памяти, логические элементы и транзисторы [5 – 7].

Основными характеристиками, определяющими оптические свойства МКР, являются дисперсия и потери на распространение волн в оптическом микроволноводе, из которого изготовлен резонатор, а также коэффициенты связи волноводов для ввода-вывода излучения и МКР [8,9]. Актуальной задачей создания ФИС является разработка методов быстрой диагностики свойств МКР, обеспечивающих однозначное определение их рабочих характеристик. Одним из таких методов является метод рефлектометрии обратного рассеяния [10, 11]. В этом методе рабочие характеристики МКР определяются путем математического расчета из экспериментальных рефлектограмм. Преимуществом является простота модели, которая позволяет однозначно определить основные характеристики из рефлектограммы ФИС, содержащей один или несколько МКР. Актуальной задачей является сопоставление результатов, полученных методом рефлектометрии обратного рассеяния с экспериментальными характеристиками, измеренными оптическим векторным анализатором высокого разрешения, что позволит сделать вывод о применимости метода в широком диапазоне частот.

Цель настоящей работы заключается в определении коэффициентов связи, дисперсии и потерь на распространение кремниевых МКР при помощи метода

оптической рефлектометрии обратного рассеяния и применении этих параметров для численного моделирования передаточных характеристик исследуемых структур.

2. Метод рефлектометрии обратного рассеяния

Исследуемый МКР диаметром $d = 256$ мкм представляет собой замкнутый прямоугольный кремниевый микроволновод, симметрично связанный с двумя прямыми микроволноводами для ввода и вывода оптического сигнала. Микроволноводы имеют сечение 500×220 нм² и окружены оксидом кремния толщиной более 2 мкм. Измерение рефлектограмм проводилось с помощью рефлектометра обратного рассеяния Luna OBR 4600. Оптический сигнал из рефлектометра вводился через склотовое оптическое волокно в брэгговский преобразователь на вход МКР (см. рисунок 1(а)). Методика проведения измерений изложена в нашей недавней работе [11]. Рассмотрим подробнее применение данного метода для определения дисперсионных свойств микроволноводов. При проведении измерений прибор регистрирует зависимость мощности отраженного сигнала от времени, как показано на рисунке 1 (б). Как было показано в работах [10, 11] рефлектограмма МКР демонстрирует эквидистантную последовательность пиков, образованную в результате циркуляции сигналов. На рисунке 1 (б) момент времени регистрации первого пика в этой эквидистантной последовательности выбран за 0. Как видно из данного рисунка время задержки сигнала по кольцу составляет $\tau = 11,25$ пс. Полученное время задержки позволяет определить дисперсионные свойства исследуемого МКР, а именно групповой показатель преломления (n_g) с помощью следующего выражения $n_g = (\tau c)/l$, где l – длина кольца, c – скорость света. Отсюда был определен групповой показатель преломления $n_g = 4,19$. Отметим, что полученное значение времени задержки может быть использовано для определения расстояния между резонансными частотами $\Delta f = 1/\tau = c/(n_g l)$, которое составляет $\Delta f = 88,9$ ГГц. Полученный групповой показатель преломления может быть использован для нахождения зависимости мощности отраженного сигнала от координаты. Для этого координата z рассчитывается из времени при помощи выражения $z = (ct)/n_g$. Результат расчета показан на рисунке 1 (в). Как видно расстояние между пиками кратно длине кольца $l = 804$ мкм. В работе [11] подробно описан метод определения коэффициента связи по мощности κ и потерь на распространение α при анализе полученных рефлектограмм. Исследуемый МКР характеризовался следующим набором параметров: $\kappa = 0,167$; $\alpha = 3,25$ дБ/см.

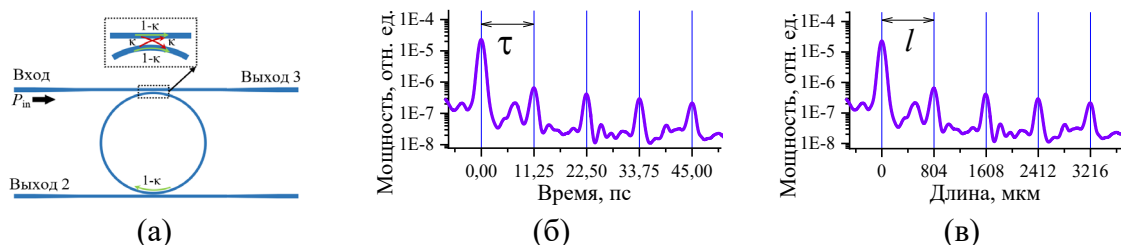


Рисунок 1. Структура МКР (а); зависимости отраженной мощности от времени (б) и координаты (в)

С целью проверки применимости метода рефлектометрии обратного рассеяния для определения параметров МКР в широком диапазоне частот было проведено экспериментальное исследование его передаточных характеристик. Результаты измерения передаточных характеристик МКР с выходов 3 и 2 (см. рисунок 1(а))

представлены на рисунках 2 (а) и 2 (б) черными пунктирными линиями соответственно. Для наглядности на вставках к рисункам 2 (а) и 2 (б) показаны передаточные характеристики МКР в увеличенном масштабе. Как видно из рисунков расстояние между соседними резонансными пиками составляет $\Delta f = 88,9$ ГГц, что соответствует данным, полученным из рефлектометрии.

На следующем этапе было проведено численное моделирование передаточных характеристик МКР при помощи параметров, извлеченных из рефлектометрии. Результаты численного моделирования представлены на рисунках 2 (а) и 2 (б) красными сплошными линиями.

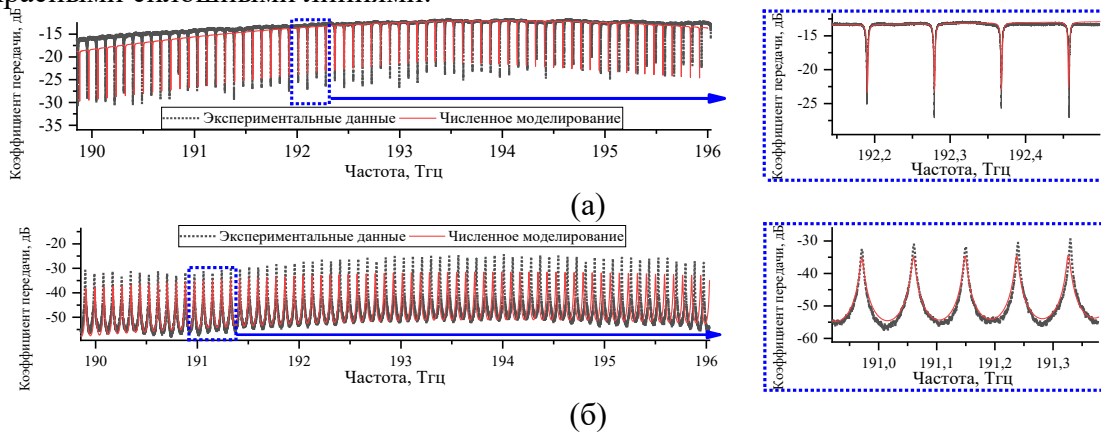


Рисунок 2. Передаточные характеристики исследуемого МКР

Из рисунков 2 (а) и 2 (б) видно, что использование параметров, полученных при помощи метода рефлектометрии в целом описывают экспериментальные характеристики. Как видно из рисунков экспериментальные величины коэффициента передачи превышают теоретические значения. Для объяснения такого поведения были найдены частотные зависимости рабочих параметров МКР из измеренных передаточных характеристик с помощью теоретической модели [8]. На рисунке 3 черными точками показаны полученные из экспериментальных передаточных характеристик зависимости потерь на распространение (а), коэффициента связи (б) и группового показателя преломления (в) от частоты. Красной сплошной линией отмечены параметры МКР, извлеченные из рефлектометрии.

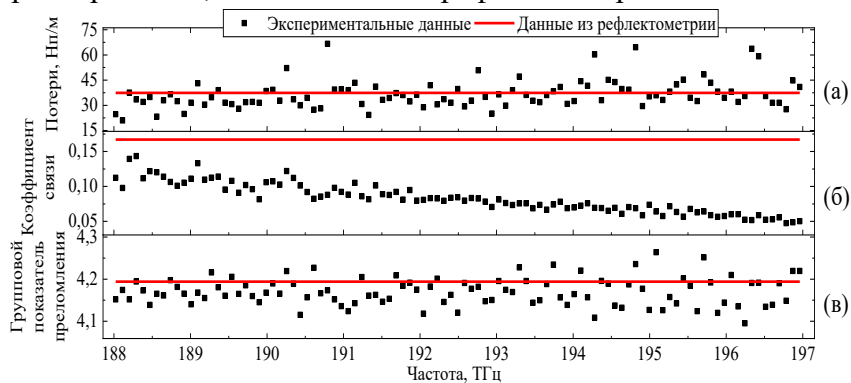


Рисунок 3. Зависимости потерь на распространение (а), коэффициента связи (б) и группового показателя преломления (в) от частоты

Из рисунка 3 видно, что в исследуемом частотном диапазоне метод рефлектометрии позволяет адекватно определить потери на распространение и групповой показатель преломления. В то же время коэффициент связи, полученный из анализа передаточных характеристик, демонстрирует гораздо более сильную частотную зависимость. Особенность метода рефлектометрии заключается в том, что

данный метод обеспечивает нахождение параметров, усредненных в некотором диапазоне частот. Это ограничивает точность определения параметров, демонстрирующих сильные частотные зависимости. Однако, как видно из рисунка 3 коэффициент связи увеличивается с уменьшением частоты, что позволяет предположить, что его значение, полученное методом рефлектометрии будет адекватно описывать эксперимент вблизи частоты 181 ТГц.

4. Заключение

Таким образом, проведенные исследования демонстрируют, что метод рефлектометрии обратного рассеяния может быть использован для быстрого и простого определения оптических свойств микрокольцевых резонаторов. С помощью данного метода были найдены потери на распространение $\alpha = 3,25$ дБ/см, коэффициент связи по мощности $\kappa = 0,167$ и групповой показатель преломления $n_g = 4,19$. В работе проведено сопоставление теоретических передаточных характеристик МКР, рассчитанных с использованием полученных параметров, и экспериментальных характеристик, измеренных оптическим векторным анализатором высокого разрешения. Показано, что полученные значения группового показателя преломления и потерь на распространение определяются с высокой точностью. Стоит отметить, что при анализе рефлектограмм необходимо принимать во внимание сильную частотную зависимость коэффициента связи.

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

Список литературы

1. Blumenthal D. J. et al. Silicon nitride in silicon photonics //Proceedings of the IEEE. – 2018. – Vol. 106. – №. 12. – pp. 2209-2231.
2. Marpaung D. et al. Integrated microwave photonics //Laser & Photonics Reviews. – 2013. – Vol. 7. – №. 4. – pp. 506-538.
3. Qiu H. et al. A continuously tunable sub-gigahertz microwave photonic bandpass filter based on an ultra-high-Q silicon microring resonator //Journal of Lightwave Technology. – 2018. – Vol. 36. – №. 19. – pp. 4312-4318.
4. Sinatkas G. et al. Electro-optic modulation in integrated photonics //Journal of Applied Physics. – 2021. – Vol. 130. – №. 1. – pp. 010901.
5. Xu Q., Lipson M. All-optical logic based on silicon micro-ring resonators //Optics express. – 2007. – Vol. 15. – №. 3. – pp. 924-929.
6. Nikitin A. A. et al. Optical bistable SOI micro-ring resonators for memory applications //Optics Communications. – 2022. – Vol. 511. – pp. 127929.
7. Nikitin A. A. et al. Carrier-induced optical bistability in the silicon micro-ring resonators under continuous wave pumping //Optics Communications. – 2021. – Vol. 480. – pp. 126456.
8. Nikitin A. A. et al. Nonlinear frequency response of the multi-resonant ring cavities //Results in Physics. – 2020. – Vol. 18. – pp. 103279.
9. Ershov, AA. et al. Extraction of the optical properties of waveguides through the characterization of silicon-on-insulator integrated circuits // Microwave and Optical Technology Letters. – 2023. – pp. 1- 5.
10. Gottesman Y., Rao E. V. K., Rabus D. G. New methodology to evaluate the performance of ring resonators using optical low-coherence reflectometry //Journal of lightwave technology. – 2004. – Vol. 22. – №. 6. – pp. 1566-1572.
11. Ryabcev I.A., et al. Investigation of the Optical Properties of Silicon-on-Insulator Microring Resonators Using Optical Backscatter Reflectometry//Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. –2022. Vol. 25. – №. 6. – pp. 79-89.